

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského
inženýrství

**Implementace a analýza signálů akcelerometru
v automotive aplikaci**

Implementation and Analysis of Accelerometer
Signal in Automotive Application

2013

Bc. Vítězslav Hanák

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Vítězslav Hanák

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2601T004 Měřicí a řídicí technika

Téma:

Implementace a analýza signálů akcelerometru v automotive aplikaci
Implementation and Analysis of Accelerometer Signal in Automotive Application

Zásady pro vypracování:

1. Popis měření pohybu a zrychlení pomocí 3-osého akcelerometru.
2. Technologie MCU Freescale PowerPC.
3. Popis komunikačních rozhraní pro připojení akcelerometru.
4. Návrh komunikace a obsluhu akcelerometru.
5. Implementace měření v MCU Freescale PowerPC.
6. Analýza změřených dat pohybu.
7. Testování a zhodnocení výsledků práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] VAN SICKLE, Ted. *Programming microcontrollers in C*. 2nd ed. Eagle Rock, Calif.: LLH Technology Pub., c2001. xvi, 454 p. ISBN 18-787-0757-4.
- [2] FREESCALE. *MPC5604E Microcontroller, Datasheet documentation*, 2012.
- [3] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce DPS*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010. 123 s. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [4] HRDINA, Zdeněk a František VEJRAŽKA. *Signály a soustavy*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2001 dotisk. 234 s. ISBN 80-010-1726-5.
- [5] *Elektrotechnická měření*. Editor Libor KUBICA. 1.vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. 255 s. ISBN 978-80-7300-022-6.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Prauzek, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 19.07.2013

doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 19. 7. 2013

.....Hana'k.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat za odborné konzultace a pomoc Ing. Michalu Prauzkovi a Ing. Martinu Stankušovi. Dále pak rodině za asistenci při prováděném měření.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá měřením a analýzou kinematických dějů v automobilu. Práce zahrnuje možnosti využití akcelerometrických měření v automotive aplikaci s následnou analýzou naměřených dat.

Předmětem práce je řešení komunikace mezi mikrokontrolérem a akcelerometrem včetně zasílání zpráv po sběrnici I²C. Data jsou exportována do počítače, kde jsou zpětně analyzována.

Nejprve je provedeno měření na přípravku pro ověření měření úhlu náklonu akcelerometru. Dále je provedeno měření reálných dat akcelerace v automobilu. Pomocí známých fyzikálních zákonů je proveden přepočet změřené akcelerace na jiné fyzikální veličiny. Analýza a zpracování dat je prováděno v programu Matlab.

Klíčová slova

Akcelerometr, automotive, mikrokontrolér, sběrnice, MEMS, PowerPC, měření zrychlení

Abstract

This Master's thesis deals with measurement and analysis of kinematic actions in the car. Thesis describes possibilities of using of an accelerometer measurement in an automotive application, followed by analysis of measurement data.

The aim of thesis is solution of communication between microcontroller and accelerometer, including data transfer messages via I²C bus. The data are exported to the computer, where they are retrospectively analyzed.

The first measurement is performed for verification of measure of the tilt angle of the car. Following measurement is real data measurement of the car acceleration. The known physical laws are used to recalculate measured acceleration to other physical values. Analysis and recalculation of data is done with Matlab software.

Key Words

Accelerometer, Automotive, Microcontroller, Bus, MEMS, PowerPC, Acceleration measurements

Seznam symbolů a zkratek

ACK	(Acknowledgment), potvrzení přijetí zprávy
CAN	(Controller Area Network), druh komunikační sběrnice
CISC	(Complex Instruction Set Computer), procesor s komplexní instrukční sadou
CRC	(Cyclic Redundancy Check), kontrolní součet zprávy
CS	(Chip Select), signál výběr čipu
DMA	(Direct memory access), přímý přístup do paměti
FIFO	(First In, First Out), paměť typu fronta
GND	(Ground), zemní potenciál
I/O	(Input / Output), vstupy / výstupy
I ² C	(Inter-Integrated Circuit), druh vnitřní komunikační sběrnice
ID	(Identifier), identifikační číslo
IBM	(International Business Machines Corporation), název společnosti
MCU	(Microcontroller unit), jednočipový počítač, mikrokontrolér.
MEMS	(Micro Electro-Mechanical Systems), miniaturní elektro-mechanická součástka
MISO	(Master In, Slave Out), signál sběrnice SPI
MIPS	(Million Instructions Per Second), jednotka aritmetického výkonu procesoru
MPU	(Memory Protect Unit), ochrana paměti mikrokontroléru
MOSI	(Master Out, Slave In), signál sběrnice SPI
LDO	(Low drop output), typ stabilizátoru s nízkou napětíovou ztrátou
LIN	(Local Interconnect Network), druh komunikační sběrnice
RAM	(Random Access Memory), paměť s náhodným přístupem
RISC	(Reduced Instruction Set Computer), procesor s redukovanou instrukční sadou
PWM	(Pulse Width Modulation), pulzní šířková modulace
SCK	(Serial Clock), signál sběrnice SPI
SD	(Secure Digital), typ paměťové karty
SDA	(Serial Data), sériový přenos dat
SPI	(Serial Peripheral Interface), druh vnitřní komunikační sběrnice
ODR	(Output Data Rate), výstupní frekvence dat
PIT	(Periodic Interrupt Timer), cyklické přerušení v mikrokontroléru
USB	(Universal Serial Bus), univerzální sériová sběrnice

Seznam obrázků

Obrázek 1 - obdélníková metoda a integrál po převodu do numerického tvaru[2].....	3
Obrázek 2 – možnosti aplikace mikrokontrolérů Freescale MPC56xx [4].....	5
Obrázek 3 - blokové schéma mikrokontroléru MPC5604B[4]	6
Obrázek 4 – ukázka vnitřní struktury MEMS akcelerometrů[16].....	8
Obrázek 5 – rozsahy citlivostí použití akcelerometrů[11]	8
Obrázek 6 – princip kapacitních akcelerometrů[13].....	9
Obrázek 7 – princip piezoelektrického akcelerometru[14]	10
Obrázek 8 - princip piezorezistivního akcelerometru[14].....	11
Obrázek 9 – princip teplotního akcelerometru[14]	11
Obrázek 10 – Akcelerometr MMA845xQ[10].....	12
Obrázek 11 – Blokové schéma akcelerometru MMA8451Q [10]	13
Obrázek 12 – standardní zapojení LDO stabilizátoru LE33[7].....	14
Obrázek 13 – ukázka komunikace více zařízení pomocí SPI sběrnice	16
Obrázek 14 – ukázka komunikace více zařízení pomocí sběrnice I ² C.....	17
Obrázek 15 - průběh přenosu bitů po sběrnici I ² C [9]	17
Obrázek 16 – datový rámec zprávy I ² C [9].....	18
Obrázek 17 – Blokové schéma komunikace mezi médii	18
Obrázek 18 – rozložení pinů akcelerometru MMA8451Q[10]	19
Obrázek 19 – schéma zapojení přípravku	20
Obrázek 20 – princip fronty FIFO	22
Obrázek 21 – diagram detekce příchozí zprávy	23
Obrázek 22 – diagram manipulace s daty	26
Obrázek 23 – orientace akcelerometru v prostoru[10].....	28
Obrázek 24 – náklon akcelerometru	29
Obrázek 25 – graf otočení o 90° ve všech osách	31
Obrázek 26 – graf vzájemné změny statického zrychlení v ose X a Z	31
Obrázek 27 – graf naměřeného průběhu náklonu po kroku 5°	32
Obrázek 28 – graf vzájemné změny statického zrychlení v ose X a Z	34
Obrázek 29 - graf naměřeného průběhu náklonu po kroku 10°	34
Obrázek 30 – graf náklonu automobilu v ose X ve [°]	35
Obrázek 31 – graf zrychlení automobilu při měření náklonu všech osách	36
Obrázek 32 – graf zrychlení automobilu v ose Y na rozsahu 2g	36
Obrázek 33 – graf okamžité rychlosti Obrázek 34 – graf přepočítané dráhy.....	37
Obrázek 35 – graf zrychlení automobilu v ose Y na rozsahu 4g	37
Obrázek 36 – graf okamžité rychlosti Obrázek 37 – graf přepočítané dráhy.....	38
Obrázek 38 – graf zrychlení automobilu v ose Y na rozsahu 8g	38
Obrázek 39 – graf okamžité rychlosti Obrázek 40 – graf přepočítané dráhy.....	39
Obrázek 41 – graf měření úrovně vibrace při nastartovaném motoru.....	40
Obrázek 42 – graf otřesů na špatné vozovce v ose X.....	40
Obrázek 43 – graf otřesů na špatné vozovce ve všech osách.....	41

Obrázek 44 – graf zobrazení prudkého brzdění	42
Obrázek 45 – graf okamžité rychlosti při brzdění	42
Obrázek 46 – graf zpomalení Obrázek 47 – graf brzdné dráhy	43
Obrázek 48 – graf tečného zrychlení při průjezdu zatáčkou v ose X.....	43
Obrázek 49 – graf zrychlení při průjezdu zatáčkou ve všech osách	44

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Přesnost a citlivost akcelerometru v závislosti na rozlišení [6]	12
Tabulka 2– ukázka registru Data Status[6]	24
Tabulka 3 – ukázka hodnot v 16-bitovém čísle[6]	25
Tabulka 4 – Naměřené a přepočítané hodnoty 0° až 90°	30
Tabulka 5 - naměřené a přepočítané hodnoty -90° až 90°	33
Tabulka 6 – srovnání naměřených a z grafu odečtených hodnot času 2g	37
Tabulka 7 – srovnání naměřených a z grafu odečtených hodnot času 4g	37
Tabulka 8 – srovnání naměřených a z grafu odečtených hodnot času 8g	38

Obsah

1	Úvod	1
2	Měření pohybu a zrychlení	2
2.1	Rychlost	2
2.2	Zrychlení	2
2.3	Numerická integrace	3
3	Technologie	4
3.1	Historie PowerPC	4
3.2	Freescall PowerPC	5
3.2.1	Parametry MPC5604B	5
3.2.2	Vnitřní popis periferií mikrokontroléru MPC5604B	6
3.3	MEMS	7
3.4	Akcelerometr	8
3.5	Základní principy akcelerometrů	9
3.5.1	Kapacitní	9
3.5.2	Piezoelektrické	10
3.5.3	Piezorezistivní	10
3.5.4	Tepelné	11
3.6	Akcelerometr MMA8451Q	12
3.6.1	Základní parametry MMA8451Q	12
3.6.2	Režimy akcelerometru	13
3.7	Paměťová karta	13
3.7.1	LDO stabilizátor LE33	14
3.7.2	Parametry LE33C	14
4	Komunikační rozhraní	15
4.1	Sběrnice SPI	15
4.2	Sběrnice I ² C	16
4.2.1	Specifikace I ² C	17
4.3	Návrh komunikačního rozhraní	18
4.4	Implementace zapojení komponentů	18
4.4.1	Zapojení pinů akcelerometru	19

4.4.2	Popis schématu.....	20
5	Popis softwaru	21
5.1	Popis programu	21
5.2	Posílání zpráv	21
5.2.1	Fronta FIFO.....	21
5.2.2	Struktura zprávy	22
5.3	Přijetí zprávy	23
5.4	Vzorkování dat.....	23
5.5	Manipulace s daty	24
5.6	Struktura programu MAIN.....	26
6	Analýza naměřených dat	28
6.1	Statické zrychlení	28
6.2	Měření náklonu z 90° do 0°	30
6.3	Měření náklonu z -90° do 90°	33
6.4	Měření náklonu automobilu	35
6.5	Měření akcelerace	36
6.5.1	2g rozsah	36
6.5.2	4g rozsah	37
6.5.3	8g rozsah	38
6.6	Měření vibrací a otřesů.....	39
6.7	Měření brzdění	41
6.8	Měření průjezdu zatáčkou	43
6.9	Parametry testovacího vozidla	44
7	Závěr	45
	Seznam použité literatury	46

1 Úvod

Aktuálním trendem v automobilovém průmyslu je stále častější a komplexnější integrace elektronických měřících a řídicích systémů v automobilu. Zároveň neustále se zvyšující nároky na bezpečnost provozu, iniciují stále vyšší požadavky na bezpečnostní systémy. Důsledkem je požadavek pro vytvoření měřícího systému na zpracování kinematických dějů v automobilu, jež by mohlo zvýšit bezpečnost.

Předmětem této diplomové práce je implementace akcelerometru do automotive aplikace, analýza a zpracování naměřených dat. Cílem této diplomové práce je vytvořit měřící systém zaznamenávající kinematické děje v automobilu a následná analýza naměřených dat.

Práce obsahuje popis rozboru teoretické problematiky z fyzikálního pohledu. Prostředkem k vytvoření měřícího řetězce je sestavení hardwaru a návrh softwaru pro mikrokontrolér. Komponenty hardwaru tvoří mikrokontrolér a akcelerometr. Akcelerometr je elektronická součástka měřící zrychlení. Mikrokontrolér je programovatelná součástka, která vykonává pomocí softwaru požadované funkce. V mé práci má mikrokontrolér za úkol komunikovat s akcelerometrem a získávat naměřená data. Za pomoci akcelerometru a matematického aparátu se dají měřit dynamické vlastnosti automobilu. Akcelerometrem se rovněž dají měřit komfortní vlastnosti automobilu, především nežádoucí vibrace například motoru nebo otřesy způsobené špatným stavem vozovky. V poslední řadě se za pomoci tříosého akcelerometru dá stanovit náklon automobilu v terénu.

Pro následnou analýzu dat jsou data převedena do počítače a zpracována programem Matlab. V programu Matlab jsou data načtena, přepočítána na zrychlení a vykreslena do grafů. Dále jsou zde provedeny přepočty na rychlost a uraženou dráhu pomocí numerické integrace.

V práci je navržena a naprogramována komunikace mezi mikrokontrolérem Freescale MPC5604B a akcelerometrem Freescale MMA8451Q po komunikační sběrnici I²C. V práci jsou uvedeny výsledky provedených měření, které jsou porovnány s daty z akcelerometru.

Tato práce je dílčí součástí automotive systému připojeného k palubnímu počítači vozidla. Celý systém bude obsahovat řídicí mikrokontrolér, komunikaci s mobilním telefonem pomocí Bluetooth, kamerový systém, datové úložiště a další volitelné prvky jako Handsfree, GSM modul nebo GPS.

2 Měření pohybu a zrychlení

2.1 Rychlost

Rychlostí pohybu rozumíme dráhu, kterou urazí hmotný bod za jednotku času. Průměrnou rychlostí označujeme

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \left[\frac{m}{s} \right]$$

kde Δs je konečná vzdálenost uražená za konečný čas Δt . Pro rychlost máme odvozenou jednotku $m \cdot s^{-1}$. Okamžitou rychlost dostaneme limitním procesem zmenšování elementů dráhy a času, podíl tak přejde v derivaci. Rychlost má vektorový charakter a obecně je funkcí času. [1]

$$v = \frac{dr}{dt} = \left[\frac{m}{s} \right]$$

2.2 Zrychlení

Zrychlení z pohledu Druhého Newtonova zákona říká, jestliže na těleso působí síla a těleso se pohybuje se zrychlením, které je přímo úměrné působící síle a nepřímo úměrné hmotnosti tělesa. Tento zákon popisuje vztahy mezi silou, hmotností a zrychlením. [1]

$$F = m \cdot a \quad \Rightarrow \quad a = \frac{F}{m}$$

Zrychlením pohybu rozumíme změnu vektoru rychlosti za jednotku času. Tak jako v případě rychlosti, můžeme uvažovat konečné změny Δv za časový interval Δt . Zrychlení je pak průměrnou hodnotou časové změny, s fyzikálním rozměrem $m \cdot s^{-2}$. Okamžité zrychlení dostaneme při přechodu k diferenciálním veličinám. [1]

$$a = \frac{dv}{dt} = \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

Má smysl uvažovat směr zrychlení v osách x,y,z :

$$a(t) = i \left(\frac{d^2x}{dt^2} \right) + j \left(\frac{d^2y}{dt^2} \right) + k \left(\frac{d^2z}{dt^2} \right) [1]$$

kde je rychlost, jako vektor, vyjádřený po složkách. Obecné vyjádření vektoru zrychlení nemá tak názorný význam jako rychlost (tečna k dráze). Pokud ale vyjádříme vektor $v(t)$ pomocí jednotkového tečného vektoru, dostaneme

$$a(t) = a_t(t) + a_n(t)$$

kde n je jednotkový vektor ve směru normály. Jeho fyzikální význam je zřejmý. Zrychlení máme vyjádřeno ve složkách jako tečné a normálové, vzhledem k trajektorii. [1]

Pokud integrujeme funkční závislost zrychlení na čase, získáme rychlost:

$$v(t) = \int_0^t a(t) dt$$

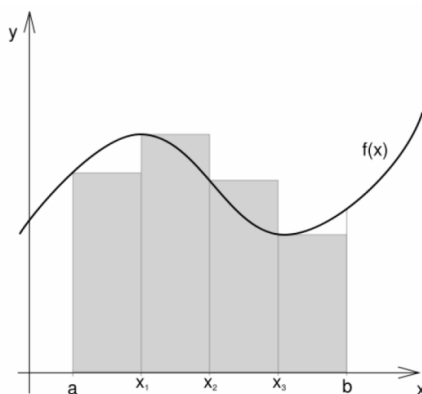
Při integraci funkční závislosti rychlosti na čase nebo při druhé integraci zrychlení získáme dráhu:

$$s(t) = \int_0^t v(t) dt, \quad s(t) = \iint_0^t a(t) dt$$

2.3 Numerická integrace

Integrál je pojem z matematiky, konkrétně integrálního počtu. Integrál zobecňuje pojmy jako plocha, objem, součet či suma. Integrovaní je opačnou operací k derivování. Při numerické integraci se snažíme nahradit integrál jiným druhem výpočtu, při kterém se snažíme zajistit, aby se získaná hodnota od skutečné hodnoty integrálu lišila co nejméně. Numerické metody výpočtu integrálu jsou velmi vhodné pro použití ve výpočetní technice, neboť umožňují vytvoření relativně jednoduchých algoritmů pro určování hodnot určitých integrálů. Výběr správné metody závisí na požadované přesnosti řešení, časové náročnosti a dalších parametrech. Existují tři základní metody numerické integrace: Obdélníková metoda, Lichoběžníková metoda a Simpsonova metoda.

Dále se soustředíme jen na základní obdélníkovou metodu. Nepřesnost metody můžeme snížit zmenšením vzorkovací periody (kroku).[2]



$$I = \frac{b-a}{N} \sum_{i=1}^N f(x_{i-1})$$

Obrázek 1 - obdélníková metoda a integrál po převodu do numerického tvaru[2]

Při načítání dat z akcelerometru nedostaneme spojitý signál, ale pouze diskrétní záznam hodnot zrychlení v čase, proto musíme použít řešení pomocí numerické integrace. Ačkoliv neznáme celý průběh křivky, ale pouze hodnoty podle vzorkovacího intervalu, můžeme plochu pod relativní křivkou s určitou přesností aproximovat, jako součet ploch tvořený jednotlivými funkčními hodnotami zrychlení s intervalem jednoho vzorku.

3 Technologie

Jedná se o jednočipový mikropočítač integrovaný na jednom čipu. Mikrokontroléry jsou programovatelnými elektronickými součástkami určeny pro širokou škálu použití. Využívají se zejména v průmyslových oborech pro realizaci měřicích a řídicích systémů. Díky své univerzálnosti, malým rozměrům, nízké spotřebě, vysoké spolehlivosti a relativně nízké ceně jsou používány v mnoha aplikacích.

Mikrokontrolér zpravidla obsahuje: aritmetickou výpočetní jednotku, operační paměť, I/O vstupy a výstupy, čítače, časovače, sběrnice a periferie, jako například A/D a D/A převodníky atd.[4]

3.1 Historie PowerPC

Na počátku 90. let 20. století firmy Apple, IBM a Motorola, známé také jako AIM aliance, si vzaly za cíl společně vytvořit moderní RISC procesor, který by byl schopný konkurovat tehdejšímu Intel a AMD procesorům a také celé x86 platformě. Architektura nově vzniklých PowerPC procesorů vychází, jak již sám název napovídá, z architektury POWER procesorů, vyvinutých firmou IBM již dříve. Úplně prvním PowerPC procesorem se stal model PowerPC 601 od firmy IBM.

Po platformě x86 bylo cílem aliance AIM zmenšit instrukční sadu, a tak vznikly procesory RISC. Jedná se o architekturu procesorů charakterizovanou pevnou délkou instrukce a oddělenou množinou instrukcí (LOAD/STORE) pracující s pamětí. PowerPC procesory se začaly vyvíjet až o čtvrtstoletí později než x86 a mají od začátku RISC 32-bitovou architekturu plánovanou do budoucnosti pro 64-bitovou.

V 70. letech, když se CISC x86 mikroprocesory začaly poprvé vyrábět, bylo důležité snížit velikost softwaru kvůli malým a velmi drahým kapacitám a to se odráželo v instrukční sadě x86 procesorů, která je hodně složitá s mnoha instrukcemi a adresovými módy.

V polovině 90. let vyrobila společnost NextGen x86 procesor, který rozkládá složité CISC x86 instrukce na jednodušší instrukce pro vlastní RISC jádro. Netrvalo to dlouho a dnes používá tuto hybridní architekturu téměř každý x86 procesor. Architektura x86 je však opět složitější o překladače instrukcí z CISC na RISC a navíc potřebuje více vyrovnávací paměti (asi o 40%). Dále pak překlad x86 instrukcí na jednodušší RISC instrukce není jednoduchá operace, obzvlášť pokud to musí procesor přeložit velmi rychle. Procesory x86 také používají velký počet adresových módů, což situaci ještě více komplikuje. Rozkládání instrukcí u x86 procesorů z nich tedy neodstraňuje složitou x86 instrukční sadu a s ní spojené problémy, ale na druhou stranu jim to umožňuje zvýšení frekvence. PowerPC procesory se díky svému malému příkonu, teplotě procesoru a vysokému výkonu používají často ve vestavěných systémech, například v automobilech, dále pak v telekomunikacích, v digitálních televizích, v kancelářských, lékařských anebo armádních zařízeních.[3]

3.2 Freescale PowerPC

Qorivva mikrokontroléry od firmy Freescale s RISC instrukční sadou jsou přímo zaměřeny pro automobilové aplikace. Jedná se o rodinu 32-bitových procesorů využívající PowerPC architekturu. Architektura PowerPC umožňuje obsluhovat jedno nebo i více zařízení. Například řídit hnací ústrojí, vnitřní elektroniku, bezpečnostní prvky a další aplikace na přístrojové desce. Jedná se o mikrokontrolér se silnou výpočetní jednotkou, s možností využití DMA. Dále obsahuje standardní periferie jako PWM, AD převodníky, sběrnice I2C, SPI atd. Velkou výhodou mikrokontrolérů od firmy Freescale z rodiny Qorivva je implementace sběrnic CAN a LIN.[4]

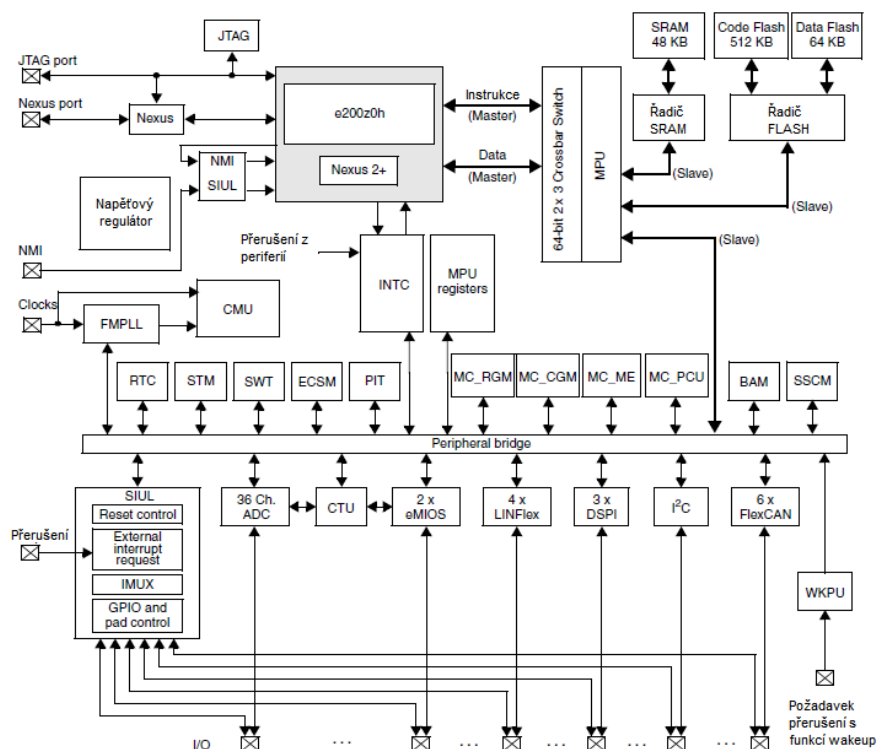


Obrázek 2 – možnosti aplikace mikrokontrolérů Freescale MPC56xx [4]

3.2.1 Parametry MPC5604B

- Napájecí napětí – 3,0V až 3,6V
- CPU 32-bitová architektura, jádro e200z0h o taktu 64MHz
- 512 KB flash integrované paměti
- 64KB (4x 16) flash paměti s ECC
- 48KB paměti SRAM
- Ochrana paměti (MPU)
- Řadič přerušení se 148 úrovní přerušení
- 10-bitový A/D převodník
- 3x SPI sběrnice (DSPI)
- 4x sériová komunikace LIN, (LINflex)
- 6x plnohodnotná sběrnice CAN (FlexCAN)
- 1x I2C sběrnice
- 123 konfigurovatelných I/O pinů (podle pouzdra)
- Real-Time čítač na frekvenci od 128kHz do 16MHz
- 6x PIT - čítač periodického přerušení[4]

3.2.2 Vnitřní popis periferií mikrokontroléru MPC5604B



Obrázek 3 - blokové schéma mikrokontroléru MPC5604B[4]

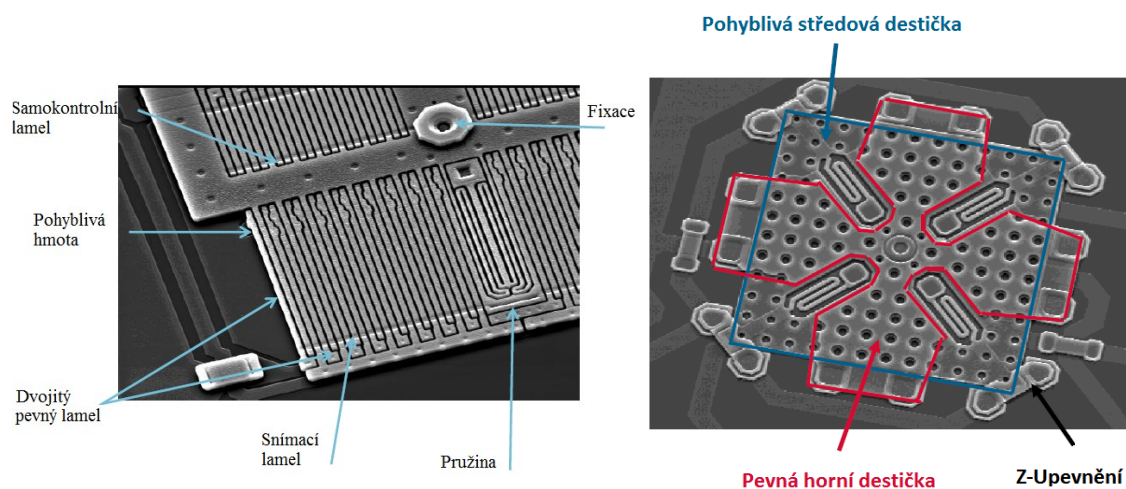
- ADC – (Analog-to-Digital Converter), Analogově / Digitální Převodník
- BAM – (Boot Assist Module), Bootovací modul
- FlexCAN – (Controller Area Network), sběrnice
- CMU – (Clock Monitor Unit), hodinové impulzy
- CTU – (Cross Triggering Unit), spouštěcí jednotka
- DSPI – (Deserial Serial Peripheral Interface), sběrnice SPI
- eMIOS – (Enhanced Modular Input Output Systém), rozšíření I/O
- FMPLL – (Frequency-Modulated Phase-Locked Loop), frekvenčně modulovaný fázový závěs
- I²C – (Inter-integrated Circuit Bus), sběrnice
- IMUX – (Internal Multiplexer), vnitřní multiplexer
- INTC – (Interrupt Controller), řadič přerušení
- JTAG – (JTAG controller), řadič JTAG
- LINFlex – (Serial Communication Interface), sběrnice
- ECSM – (Error Correction Status Module), korekce chyb modulu
- MC_CGM – (Clock Generation Module), generátor hodinových pulzů
- MC_ME – (Mode Entry Module), vstupní mód modulu
- MC_PCU – (Power Control Unit), řadič napájení

- MC_RGM – (Reset Generation Module), reset generování pulzů
- MPU – (Memory Protection Unit), ochrana paměti
- Nexus – (Nexus Development Interface), vývojové rozhraní Nexus
- NMI – (Non-Maskable Interrupt), bez maskové přerušování
- PIT – (Periodic Interrupt Timer), periodické přerušování
- RTC – (Real-Time Clock), Real-Time hodiny
- SIUL – (System Integration Unit Lite), registr se sérioparalelním přístupem
- SRAM – (Static Random-Access Memory), paměť SRAM
- SSCM – (System Status Configuration Module), status konfigurace modulu
- STM – (System Timer Module), systémový čas modulu
- SWT – (Software Watchdog Timer), softwarový časovač watchdog
- WKPU – (Wakeup Unit), řadič oživení [4]

3.3 MEMS

MEMS je technologie, kterou nejvíce vystihuje miniaturní mechanická a elektromechanická součástka. Podle velikostí může být menší než mikrometr až po několik milimetrů. MEMS zařízení mohou být relativně jednoduchá až po komplexní elektromechanické struktury s množstvím pohybů. Hlavním kritériem MEMS je, že mají pro funkci nějakou část pohyblivou. MEMS jsou miniaturizované struktury, senzory, aktuátory a elektronika integrované do mikro senzorů a mikro aktuátorů. Principem je převod různých druhů energie na jinou. Příkladem je převod pohybu na elektrický signál nebo převod elektrického signálu na pohyb.

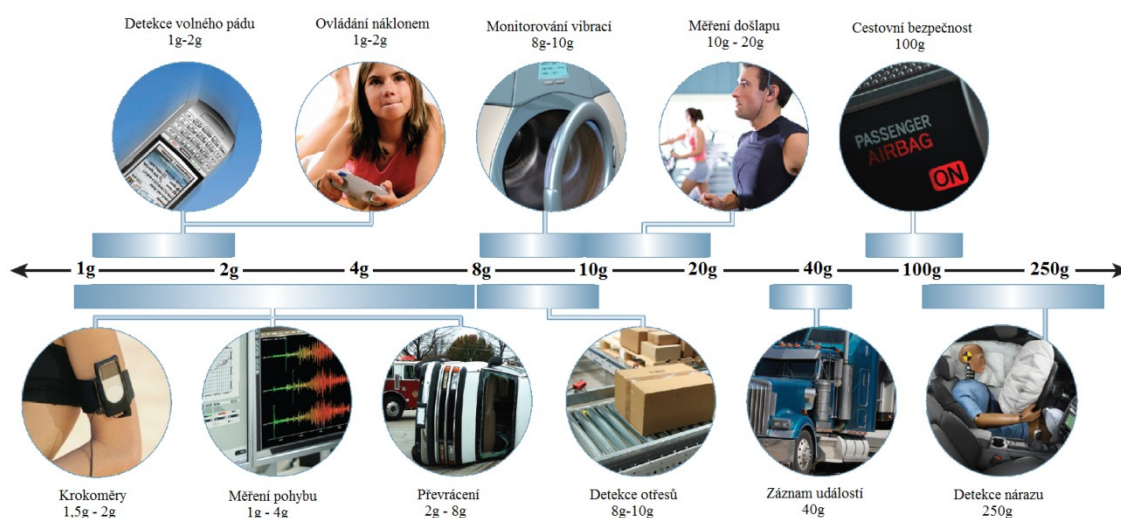
Výroba moderních akcelerometrů je založena právě na technologii MEMS, která umožňuje konstrukci elektronických i mechanických struktur o velikostech jednotek μm na jedné ploše čipu. Tím lze docílit velmi dobré citlivosti, mechanické odolnosti a spolehlivosti těchto součástek. Tyto součástky v sobě obvykle integrují samotný senzor a předzesilovač. Senzor obsahuje rovněž teplotní kompenzaci, tudíž manipulace a zapojení s tímto senzorem jsou velmi snadné a výstupní napětí ze senzoru přímo odpovídá velikosti zrychlení. Funkční princip snímacího senzoru je založen na vyrovnávání síly působící na hmotný objekt v důsledku zrychlení a síly torzní pružiny. Při použití technologie MEMS se v případě akcelerometrů využívá zejména kapacitního principu, tedy velikost výchylky mikrolamelů je indikována změnou kapacity. [15]



Obrázek 4 – ukázka vnitřní struktury MEMS akcelerometrů[16]

3.4 Akcelerometr

Akcelerometry měří zrychlení, takzvaně přeměňují změnu pohybu na měřitelný elektrický signál. Akcelerometry jsou senzory pro měření statického nebo dynamického zrychlení a jsou vhodné nejen pro měření odstředivých a setrvačných sil, ale i pro určování pozice tělesa nebo jeho naklonění. Nalézají uplatnění zejména v mobilních telefonech a automobilovém průmyslu, ale i v jiných odvětvích. S určitou přesností se dají také použít pro měření dráhy.[14]



Obrázek 5 – rozsahy citlivostí použití akcelerometrů[11]

3.5 Základní principy akcelerometrů

3.5.1 Kapacitní

Principem se jedná o mechanický pohyb vodivých desek, který vytváří navzájem rozdílnou kapacitu vlivem různé vzdálenosti ploch kondenzátoru.

Změna zrychlení se projeví na proměnné kapacitě tříelektrodového vzduchového kondenzátoru. Využívá se zde známé nelineární závislosti kapacity na vzdálenosti elektrod deskového kondenzátoru dle vzorce:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d}$$

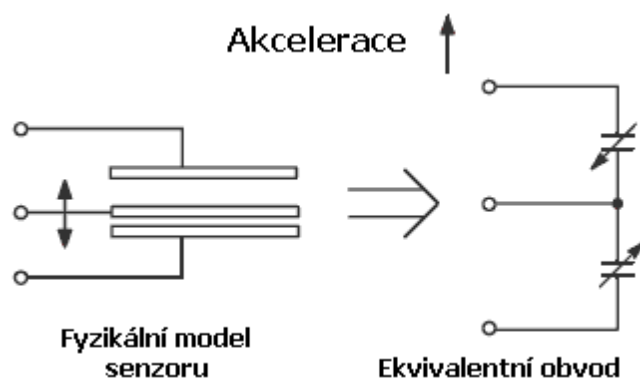
C.... kapacita kondenzátoru

εpoměrná permitivita dielektrika

S.....plocha desek kondenzátoru

d.....vzdálenost mezi deskami

Pokud tedy jednu elektrodu uděláme pohyblivou a její pohyb bude závislý na působícím zrychlení, získáme kapacitní akcelerometr. Nejčastěji se tyto akcelerometry realizují technologií MEMS.[13]



Obrázek 6 – princip kapacitních akcelerometrů[13]

Střední elektroda je zároveň hmotou, která v důsledku zrychlení mění svou polohu vůči dvěma deskám kondenzátoru, a to vždy v opačném smyslu. Tím lze sestavit citlivý vyhodnocovací můstek a měřit tak velikost zrychlení v daném směru. Použitím MEMS technologie není problém vyrobit akcelerometr měřící zrychlení ve třech osách.

3.5.2 Piezoelektrické

Hlavní části piezoelektrického akcelerometru tvoří: Piezoelektrický materiál a seismická hmota, která převádí podle Newtonova zákona hodnotu síly a hmoty (hmotnosti) na zrychlení.

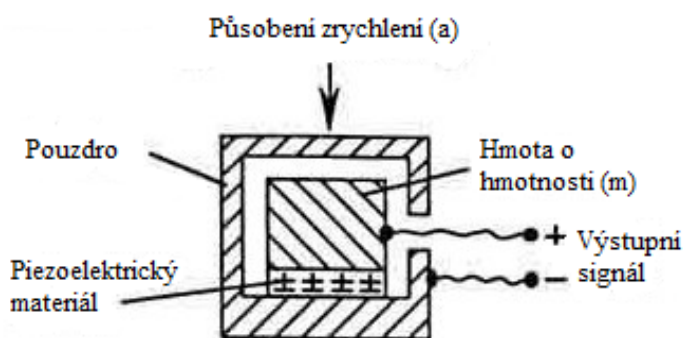
$$F = m \cdot a \Rightarrow a = \frac{F}{m}$$

F.....síla

m.....hmotnost

a.....zrychlení

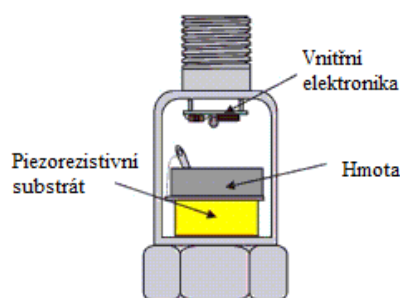
Principiálně využívají piezoelektrický materiál, který generuje náboj úměrný mechanickému namáhání, vzniklé působící akcelerací. Měření náboje piezokrystalu probíhá buď přímo pomocí externí elektroniky s vysokou vstupní impedancí, anebo častěji vnitřní elektronika senzoru převádí náboj na napěťový výstup s nízkou impedancí. Jednoduchá konstrukce umožňuje senzor napojit na jednoduchý vyhodnocovací obvod. Nemohou být použity pro měření frekvencí nižší než 0,1 Hz, tedy měření konstantního zrychlení.[14]



Obrázek 7 – princip piezoelektrického akcelerometru[14]

3.5.3 Piezorezistivní

Využívají změny odporu piezokeramiky při mechanickém namáhání vzniklém při působení zrychlení. Piezorezistivní akcelerometr je senzor, který využívá piezorezistivní materiál místo piezoelektrického krystalu a jeho prostřednictvím převádí sílu vzniklou urychlovanou hmotou na změnu odporu. V integrovaných piezorezistivních akcelerometrech se využívá sítě vyleptaných měřících piezorezistivních snímačů zapojených ve Wheatstonově můstku. Piezorezistivní akcelerometry mají tu výhodu proti piezoelektrickým, že mohou měřit i statickou akceleraci. Citlivost zrychlení je nižší než jedna setina gravitačního zrychlení, tedy velká přesnost a vysoká spolehlivost.[14]

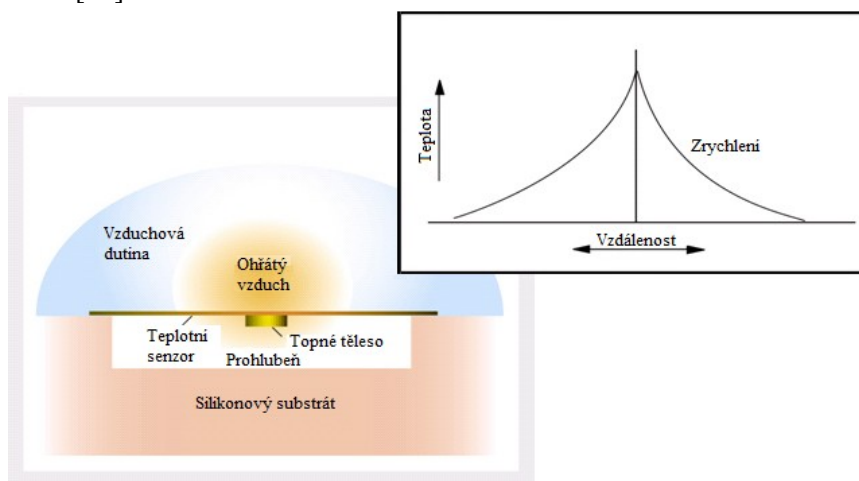


Obrázek 8 - princip piezorezistivního akcelerometru[14]

3.5.4 Tepelné

Tepelné akcelerometry využívají základní fyzikální princip, který se v podobné verzi používá u kalorimetrických průtokoměrů. Jde o přenos tepla v plynu a snímáním rozložené teploty v okolí zdroje tepla. Topné tělísko zahřívá okolní vzduch ve vzduchové komoře na konstantní teplotu. Snímáním je realizováno soustavou termočlánků hliník/polykrystalický křemík umístěné v pravidelných rozestupech. Celá tato soustava je implementována ve vyleptaném křemíkovém substrátu. Celý senzor, včetně vyhodnocovací elektroniky, je plně integrován na jednom CMOS čipu senzoru v jednom pouzdře.

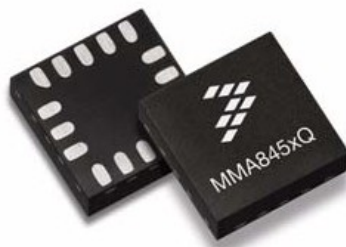
Tepelné akcelerometry využívají změny přenosu tepla klidného a proudícího vzduchu (plynu). Při převodu působení zrychlení senzor neobsahuje žádné mechanické pohyblivé části ani prvky. Vzhledem ke konstrukci mají velkou odolnost, což je dáno jednoduchým principem. Senzory ale nedosahují špičkových vlastností, co se týká přesnosti a rychlosti reakce na změnu. Naopak jsou velmi levné na výrobu, což se projeví ve výsledné ceně senzoru. Dále mají velkou odolnost proti teplotám a zničení, to zaručuje velkou spolehlivost. Dají se použít pro obrovské změny zrychlení. Nevýhodou je možnost měření jen ve dvou osách a nutno tepelně kompenzovat.[14]



Obrázek 9 – princip teplotního akcelerometru[14]

3.6 Akcelerometr MMA8451Q

MMA8451 je sofistikovaný, nízko příkonový, tříosý akcelerometr. Pracuje na kapacitním principu se 14-bitovým rozlišením převodníku, kapacity na napětí. Je vyroben technologií MEMS. Akcelerometr je zapouzdřen s vestavěnými DSP funkcemi. Flexibilně připraven pro uživatele s možností použití dvou pinů pro externí přerušení. Má konfigurovatelný rozsah měření zrychlení. Rozsahy akcelerometru jsou 2g, 4g nebo 8g, kde g odpovídá velikosti gravitačního zrychlení. [10]



Obrázek 10 – Akcelerometr MMA845xQ[10]

3.6.1 Základní parametry MMA8451Q

- Tři osy měření zrychlení x,y,z
- Rozsah napájecího napětí 1,95 - 3,6V
- Dynamický rozsah zrychlení $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g$
- Výstupní datová rychlost ODR 1,5Hz - 800 Hz
- Komunikační rozhraní I²C s frekvencí až 2,25MHz
- 2x programovatelné piny externího přerušení
- 32 vzorková fronta FIFO
- Detekce pádu nebo pohybu

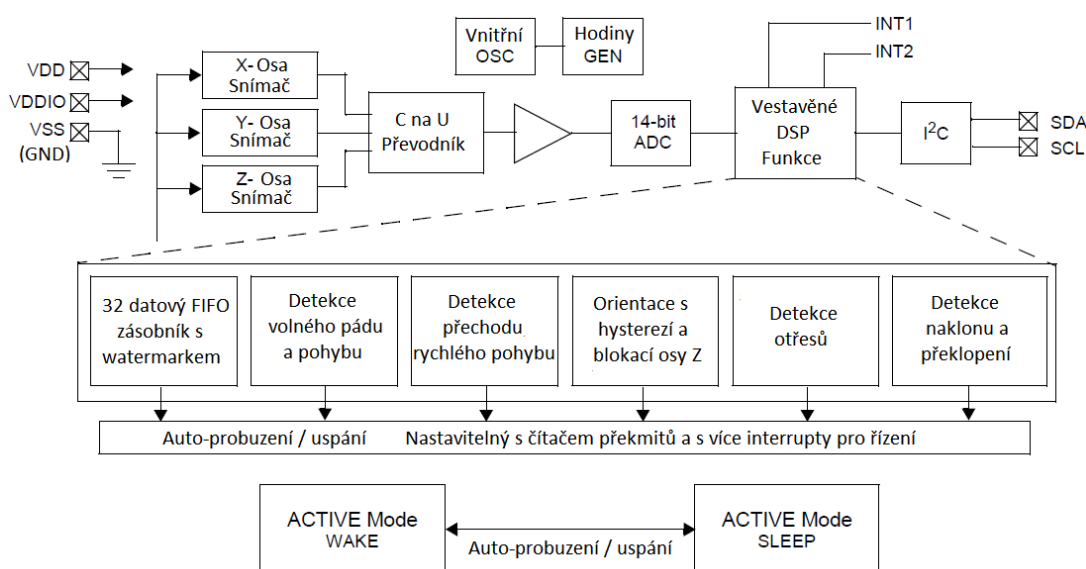
Citlivost akcelerometru je závislá na přepočtu bitů a podle nastaveném rozsahu rozlišení akcelerometru. Zároveň také na použitém rozsahu převodníku. Viz tabulka 1.

	Rozlišení 2g	Rozlišení 4g	Rozlišení 8g
14-bit	4096vzorků/g = 0.25 mg/LSB	2048 counts/g = 0.5 mg/LSB	1024 vzorků/g = 1 mg/LSB
14-bit	2,45mm.s ⁻¹	4,90 mm.s ⁻¹	9,81 mm.s ⁻¹
8-bit	64vzorků/g = 15,6 mg/LSB	32 vzorků/g = 31,25 mg/LSB	16 vzorků/g = 62,5 mg/LSB
8-bit	152,98 mm.s ⁻¹	306,46 mm.s ⁻¹	612,92 mm.s ⁻¹

Tabulka 1 – Přesnost a citlivost akcelerometru v závislosti na rozlišení [6]

3.6.2 Režimy akcelerometru

- **OFF** – akcelerometr je vypnut, sběrnice není napájena. Napájecí napětí je menší než 1,8V.
- **STANDBY** - Akcelerometr je zapnut v konfiguračním módu. V tomto režimu lze posílat zprávy po sběrnici pro konfiguraci akcelerometru.
- **ACTIVE – WAKE** – akcelerometr je v aktivním režimu. Měření dat zrychlení probíhá a je připraveno posílat zprávy po sběrnici.
- **ACTIVE – SLEEP** - akcelerometr je v aktivním režimu. Měření dat probíhá až po jeho probuzení do režimu ACTIVE - WAKE.[10]



Obrázek 11 – Blokové schéma akcelerometru MMA8451Q [10]

3.7 Paměťová karta

Paměťová karta je elektronické zařízení sloužící pro ukládání dat. Původně byla vyvinuta jako náhrada za mechanické pevné disky. Pevné disky nebyly totiž vhodné pro mobilní zařízení a to zejména kvůli velkým rozměrům a spotřebě. Velkými přednostmi paměťových karet jsou malá spotřeba, nízké napájecí napětí a odolnost na působení elektrických a magnetických polí. Při uvedení karet na trh nedošlo ke stanovení výrobního standardu a mnozí výrobci tak přišli na trh se svým typem paměťových karet. Karty se odlišovaly zejména rozměry, avšak paměťové kapacity a rychlosti přístupu jednotlivých typů karet byly podobné.[13]

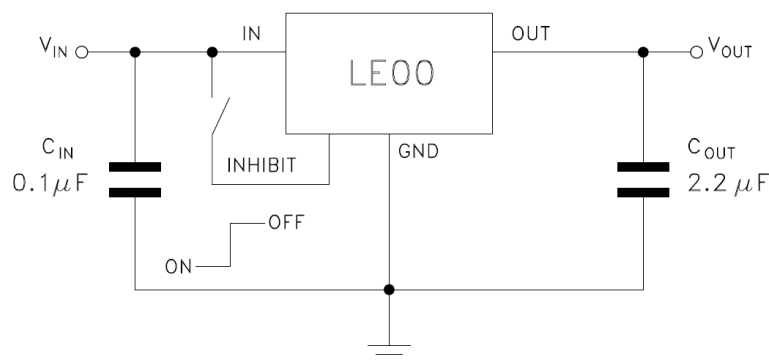
3.7.1 LDO stabilizátor LE33

Sériový stabilizátor s malým úbytkem napětí (dále jen stabilizátor LDO) je obvod, který poskytuje stabilní jmenovité napětí, které je tvořeno malým rozdílem vstupního a výstupního napětí. Pokud napěťový úbytek, který je definován jako rozdíl vstupního a výstupního napětí klesne, regulace se zastaví.

Název LDO je odvozen ze skutečnosti, že výkonový tranzistor je zapojen do série mezi vstupními a výstupními svorkami stabilizátoru. Funkce obvodu je založena na zpětném napájení výkonového tranzistoru používaného ke kontrole výstupního proudu. LDO stabilizátory se používají v mnoha aplikacích. Například v automobilovém průmyslu je malý úbytek napětí nezbytný, protože napětí baterie může klesnout až na 6 V. Požadavky malého úbytku napětí rostou také u mobilních zařízení, jako např. mobilní telefony, pagery, kamery, přenosné počítače ap. Použitým obvodem LDO je stabilizátor LE33 [8]

3.7.2 Parametry LE33C

- Pouzdro TO-92
- Výstupní napětí – 3,3V
- Maximální výstupní proud – 150mA
- Maximální vstupní napětí – 18V
- Napěťová ztráta – 0,5V
- Maximální proudový odběr - 3mA
- Proudový odběr v inhibičním módu - 100μA[7]



Obrázek 12 – standardní zapojení LDO stabilizátoru LE33[7]

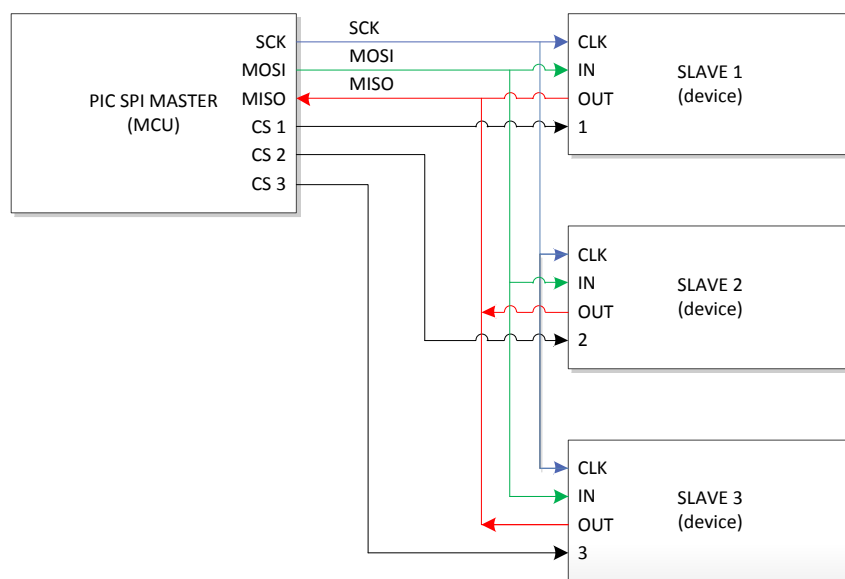
4 Komunikační rozhraní

Tato kapitola pojednává o teoretickém návrhu z pohledu toku dat mezi zařízeními. Popisuje komunikační sběrnice používané pro připojení akcelerometrů. Obsahuje teoretický návrh komunikačního rozhraní. Dále se zabývá hardwarovou implementací zapojení jednotlivých komponent.

4.1 Sběrnice SPI

Představuje sériovou sběrnici sloužící pro vzájemné propojení dvou či více komunikujících uzlů, přičemž jeden uzel vystupuje v roli takzvaného řadiče sběrnice (master) hlavní, ostatní uzly pracují v režimu (slave) vedlejší. Uzel, který pracuje jako master, obsahuje generátor hodinového signálu, který je rozveden do všech ostatních uzlů, čímž je umožněn zcela synchronní, navíc obousměrný přenos dat. Hodinový signál je rozváděn vodičem označovaným symbolem SCK. Kromě vodiče s hodinovým signálem jsou uzly propojeny dvojicí vodičů označovaných symboly MISO a MOSI, pomocí nichž se obousměrně přenáší data. Posledním signálem, který se u této sběrnice používá, je signál CS. Ten slouží k výběru některého uzlu pracujícího v režimu slave. Všechny čtyři signály – SCK, MISO, MOSI i CS pro svoji funkci vyžadují pouze jednosměrné porty, což přispívá k jednoduché a především levné implementaci této sběrnice. Ve své podstatě je SPI několik externě propojených posuvných registrů, přičemž posun je řízen společným hodinovým signálem. Jednoduchost přenosového protokolu vyplývá i z toho, že data jsou přenášena obousměrně po samostatných vodičích, takže není nutné řešit přepínání mezi vysíláním a příjmem.

SPI sběrnice často bývá implementována do mnoha mikrokontrolérů. Ve firemních dokumentacích k mikrokontrolérům se ovšem některé signály mohou značit odlišně: SCK = SCK, MOSI = SDO, MISO = SDI, CS = SSEL. Mezi nevýhody sběrnice SPI, patří především existence pouze jednoho zařízení, které může pracovat v režimu master. Dále pak možnost přenášet data pouze na kratší vzdálenosti, což je dáno nutností synchronizace hodinového signálu s přenášenými daty. [5]



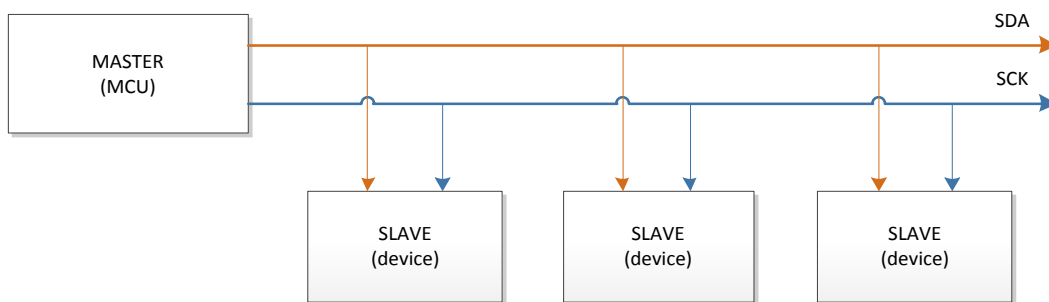
Obrázek 13 – ukázka komunikace více zařízení pomocí SPI sběrnice

4.2 Sběrnice I²C

V určitých ohledech se jedná o sběrnici podobnou SPI (existence hodinového signálu, jediný uzel typu master), ovšem některé vlastnosti těchto sběrnic jsou odlišné. Zatímco u sběrnice SPI je umožněn obousměrný přenos dat díky použití dvojice vodičů MISO a MOSI, je sběrnice I²C vybavena pouze jedním datovým vodičem SDA, z čehož vyplývá, že se data přenáší poloduplexně. Také to znamená poněkud složitější interní strukturu všech připojených zařízení, protože příslušné piny musí být možné přepínat ze vstupního režimu na režim výstupní. Rovněž zde není použit zvláštní vodič pro výběr zařízení tak jako CS u sběrnice SPI, ale každému uzlu je přiřazena jednoznačná adresa zařízení.

První signálový vodič slouží pro obousměrný přenos dat SDA, druhým vodičem pak zařízení typu master posílá všem ostatním zařízením hodinové signály SCL. V praxi je navíc nutné k této dvojici vodičů přidat i společnou signálovou zem GND. Navíc je nutné oba signálové vodiče SDA a SCL připojit přes pull-up rezistory o hodnotách odporu 1,5 kΩ nebo 4,7kΩ na napájecí napětí. Při nečinnosti nebo případném odpojení zvedají tyto dva rezistory napětí na obou signálových vodičích na úroveň logické jedničky, což je normou stanovený klidový stav. Sběrnice může v tomto stavu zůstat po libovolně dlouhou dobu a snižuje tím proudový odběr.

Obecně je možné říci, že I²C je sice poněkud složitější a pomalejší, ale zato flexibilnější. Sběrnice I²C se často používá pro komunikaci na delší vzdálenosti (řádově metry), oproti sběrnici SPI. [5]

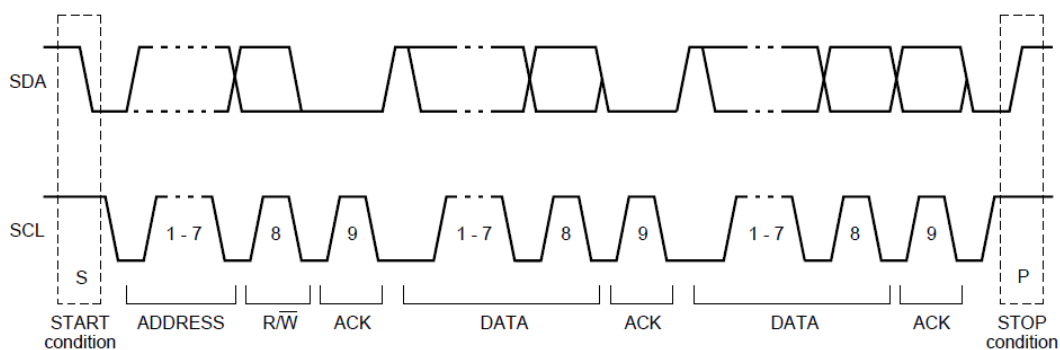


Obrázek 14 – ukázka komunikace více zařízení pomocí sběrnice I²C

4.2.1 Specifikace I²C

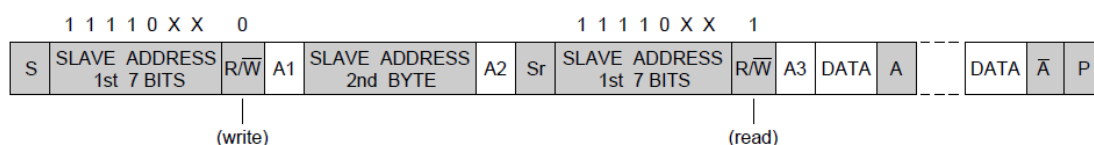
- Základní verze 7 bitové adresování, do 128 zařízení, rozšířená verze adresování 10bitové až 1024 zařízení v uzlu
- Adresa zařízení je pevně stanovena od výrobce, ale lze ji v některých případech přenastavit hardwarově.
- Používané přenosové rychlosti 100kHz, 400kHz, 1MHz a nově až 3.4MHz
- Rychlost přenosu se řídí podle nejpomalejšího čipu na sběrnici.[9]

Na obrázku 15 je vidět průběh zprávy v logických úrovních signálu mezi datovými vodiči SDA a SCL.



Obrázek 15 - průběh přenosu bitů po sběrnici I²C [9]

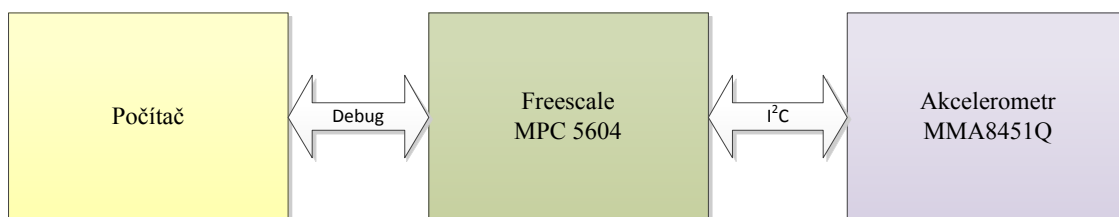
Specifikací I²C bitového rámce zprávy se definuje posloupnost přenosu dat. Nejprve musí nastat start podmínka, poté následuje adresa cílového zařízení (slave) 7 bitů. Osmý bit definuje typ zprávy, jestli je určena pro čtení z registru nebo pro zápis do registru. A1 je potvrzení přijetí zprávy z cílového zařízení tzv. ACK bit. Pokud je adresa 10bitů, tak následuje zbytek adresy (3 bity). Dále adresa registru a po potvrzení ACK následují data, která chceme zapsat nebo data, která posílá zařízení zpět při čtení z registru. Jako poslední následuje kontrolní součet CRC.[9]



Obrázek 16 – datový rámec zprávy I²C [9]

4.3 Návrh komunikačního rozhraní

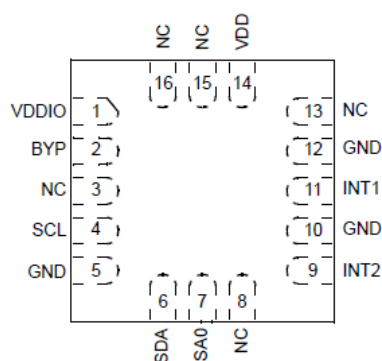
Předmětem návrhu je sestavit přípravek pro sběr dat z akcelerometru a následně jej připojit k vývojovému kitu s mikrokontrolérem. Poté exportovat data do počítače pomocí vývojového prostředí CodeWarrior.



Obrázek 17 – Blokové schéma komunikace mezi médii

4.4 Implementace zapojení komponentů

Schéma zapojení je realizováno na desce plošného spoje. Jedná se o přípravek pro připojení akcelerometru MMA8451Q součástkami pro ochranu a správnou funkci. Návrh je realizován podle katalogového zapojení. Schéma zapojení a deska plošných spojů byla navržena softwarem Eagle 5.11. Samotné propojení sběrnice I²C s vývojovým kitem s mikrokontrolérem je realizováno pomocí pin headrů a kroucené trojlinky. Přípravek rovněž vyžaduje připojení externího stejnosměrného zdroje napětí v rozmezí od 5V do 20V. Ve schématu je rovněž zapojení paměťové karty, připravené pro sběr dat.

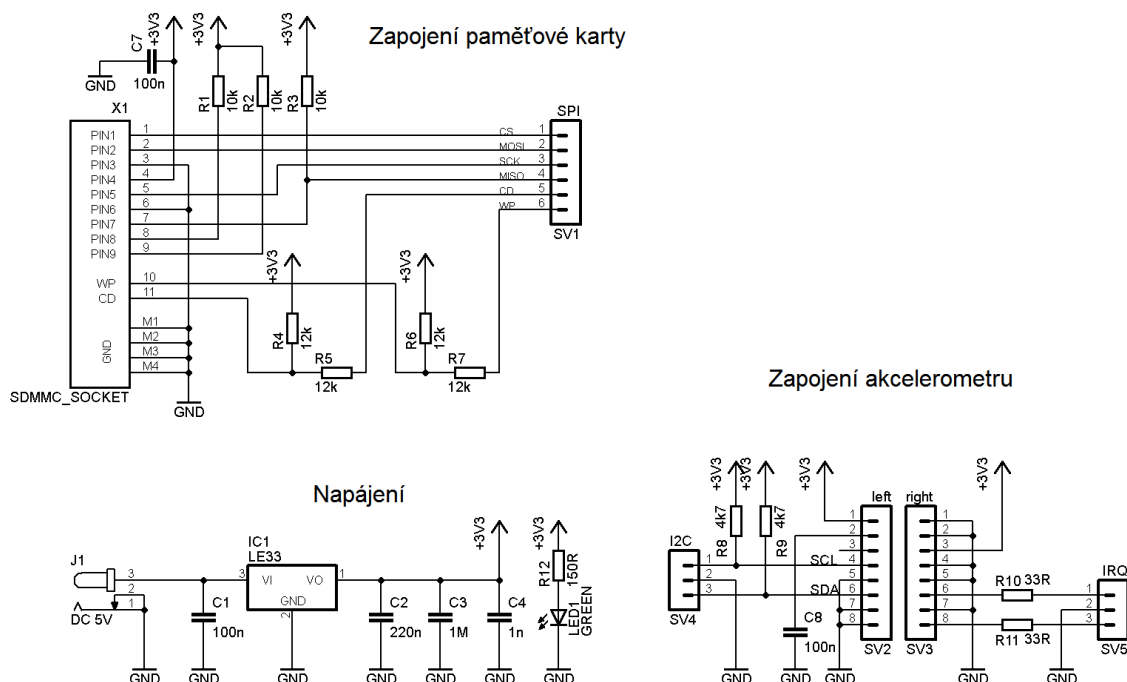


Obrázek 18 – rozložení pinů akcelerometru MMA8451Q[10]

4.4.1 Zapojení pinů akcelerometru:

Pin	Název pinu	Popis
1	VDDIO	Vnitřní napájecí napětí (1.62V - 3.6V)
2	BYP	Bypass kondenzátor (0.1 μ F)
3	NC	Nezapojen
4	SCL	I ² C SCL clock, otevřený kolektor
5	GND	Zemnicí potenciál
6	SDA	I ² C SDA data, otevřený kolektor
7	SA0	Konfigurovatelná adresa akcelerometru
8	NC	Nezapojen (GND nebo VDD)
9	INT2	Externí výstupní přerušení 2
10	GND	Zemnicí potenciál
11	INT1	Externí výstupní přerušení 1
12	GND	Zemnicí potenciál, vstup
13	NC	Nezapojen (GND nebo VDD)
14	VDD	Napájecí napětí (1.95V to 3.6V)
15	NC	Nezapojen (GND nebo VDD)
16	NC	Nezapojen (GND nebo VDD)

Tabulka 1 – zapojení akcelerometru[10]



Obrázek 19 – schéma zapojení přípravku

4.4.2 Popis schématu

- Zapojení paměťové karty je realizováno pomocí soketu a pasivních prvků. Výstupem je připojení na SPI sběrnici pomocí šesti pinů na mikrokontrolér.
- Zapojení akcelerometru je řešeno atypickou patičí na výstupní pin header, jež tvoří fyzickou vrstvu sběrnice I²C, připojenou kroucenou trojlinkou SCL, GND a SDA. Zároveň jsou připojeny pull-up rezistory 4k7 na piny sběrnice.
- Napájení je řešeno pomocí USB kabelu, což odpovídá rozsahu vstupního napětí 5V. To je připojeno na LDO stabilizátor s výstupním napájením 3,3V. Kondenzátory slouží pro udržení náboje a pro filtraci napětí.
- LED1 indikuje stav napájení z LDO stabilizátoru do obvodu.

5 Popis softwaru

Obsahem této kapitoly je popis softwarové části v jazyce C. Použité programové prostředí CodeWarrior 10.2 od firmy Freescale. V této kapitole je popsána problematika vybraných částí kódu.

5.1 Popis programu

Celý program má za úkol komunikovat s akcelerometrem po sběrnici I2C a shromažďovat naměřená data. Program je strukturován do jednotlivých souborů .c s knihovny .h. Na začátku programu nejprve proběhnou inicializační metody mikrokontroléru a poté se inicializuje akcelerometr.

Mikroprocesor se stará o vzorkování dat z akcelerometru. Kde po stanoveném vzorkovacím čase posílá po sběrnici zprávy na registry pro čtení z jednotlivých os. Přijatá data z akcelerometru mikrokontrolér detekuje a příslušné hodnoty uloží do mezipaměti. Poté se data zpracují na datový formát znaménkový integer, následně se uloží na danou pozici do interní paměti.

5.2 Posílání zpráv

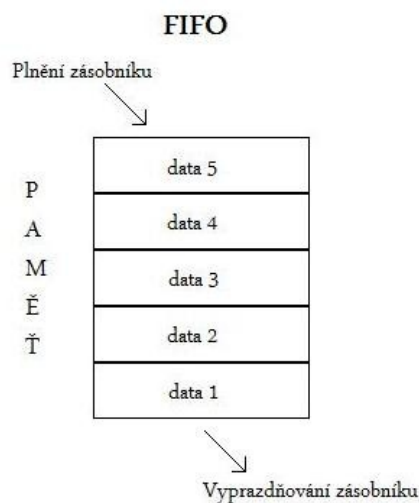
Program pro sběrnici I²C se skládá z inicializačního nastavení, fronty zpráv, transakce a samotného přenosu dat. Nejprve je nutné sběrnici inicializovat, to znamená nastavit linkovou vrstvu. To obsahuje výběr přenosové rychlosti (100kHz nebo 400kHz). Nastavení adresy cílového zařízení (slave), v našem případě adresa akcelerometru. Ta je pro zápis 0x38 a pro čtení 0x39. Nastavení potvrzování přijetí zpráv cílového zařízení – ACK atd.

Zprávy, které mají být odeslány, jsou nejprve postupně ukládány do zásobníku s příslušným unikátním číslem ID. Jedná se o frontu zpráv typu fifo. Zprávy ovšem nejsou ihned odesílány po sběrnici na cílové zařízení, aby přenos permanentně nezatěžoval mikrokontrolér. Zprávy jsou odeslány až po vyvolání přerušení. V přerušení se data v cyklu postupně odešlou po sběrnici a fronta fifo se vyprázdní.

Transakce má za úkol převést zprávy ze zásobníku, které čekají na odeslání, postupně na frontu zpráv, kde se přeloží na protokol I²C. Přenos dat probíhá v přerušení mikrokontroléru a v souladu s protokolem I²C.

5.2.1 Fronta FIFO

Popisuje, jakým způsobem přistupujeme na paměť při zápisu a čtení. Jedná se o druh fronty, tedy o datovou hodnotu, uloženou do paměti jako první, která bude také jako první přečtena. Viz. Obrázek níže. V programu je vytvořeno hned několik zásobníků, jak pro posílání dat do akcelerometru, tak pro ukládání zpráv před odesláním.



Obrázek 20 – princip fronty FIFO

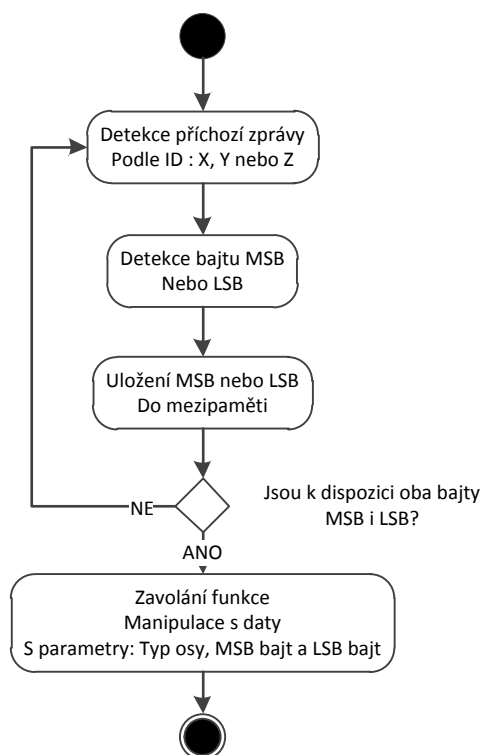
5.2.2 Struktura zprávy

```
/*Read data 1 from Accelrometer*/
iic_tr.opcode = IIC_MASTER_OPCODE_RD; // Opcode for READ
iic_tr.bus_addr = IIC_TEST_ADDR_MMA8451Q; //Address of Accelerometer = 0x38
iic_tr.reg_addr_size = IIC_TEST_REG_ADDR_SZ_MMA8451Q; //Number of addr bytes
iic_tr.reg_data_size = IIC_TEST_REG_DATA_SZ_MMA8451Q; //Number of data bytes
iic_tr.reg_addr = MMA8451Q_OUT_X_MSB; //Register address X MSB
iic_tr.user_id = X_MSB_ID; //Identification of message
iic_tr.cb = (IIC_MASTER_CB) iic_test_cb; // Push data to callback (err,
user_id, data)
```

- opcode – nastavení zprávy pro čtení ze zařízení nebo pro zápis do zařízení, (0 – čtení, 1 – zápis).
- bus_addr – adresa cílového zařízení slave, pro akcelerometr MMA8451Q = 0x38
- reg_addr_size – počet adresovaných zařízení v bajtech (pouze jedno zařízení)
- reg_data_size – počet zpráv adresovaných na jedno zařízení, například čtení z více registrů v jedné zprávě. (nastaveno na jedna).
- reg_addr – adresa cílového registru zařízení slave. V tomto případě se jedná o čtení z registru 0x01, což odpovídá čtení horních osmi bitů MSB, hodnoty zrychlení v ose X.
- user_id – identifikátor zprávy, ID je unikátní číslo pro jeden typ zprávy. Pro zprávu čtení akcelerace z osy X MSB bajtu je číslo 0x7EAD0001.
- cb – callback, je ukazatel na pole o třech proměnných: (err, user_id, data), do těchto proměnných se vrátí hodnoty po přijetí dat, ale také pokud se přenos neprovede úspěšně.

5.3 Přijetí zprávy

Detekce příchozí zprávy se provádí prostřednictvím identifikačního čísla zprávy ID. Při čtení akcelerace je nutné poslat šest požadavků na hodnoty, protože každá osa X, Y a Z je rozdělena na MSB bajt a LSB bajt. Proto je nutné poslat zprávu na šest různých registrů akcelerometru. Jelikož jsou data z os rozdělena vždy do dvou bajtů a nemusí být data vrácena popořadě, je nutné ukládat postupně jednotlivé bajty do mezipaměti a seřadit je. Nejprve musí být uložen bajt X MSB, poté následuje bajt X LSB, dále Y MSB atd., aby se uložená data dala zpětně přechíst a zároveň, aby se zamezilo prolínání os.



Obrázek 21 – diagram detekce příchozí zprávy

5.4 Vzorkování dat

Vzhledem k omezené velikosti interní paměti mikrokontroléru je nutné data vzorkovat s pomalejší rychlostí, abychom dosáhly delšího časového úseku, tedy alespoň 30 až 60 sekund pro měření.

K dispozici je místo pro zásobník o maximální velikosti 18kB, ale pro 14-ti bitová data uložená v 16-ti bitovém čísle je možno uložit poloviční objem dat, tedy přesně 9216 vzorků pro všechny osy. Tomu odpovídá 3072 vzorků pro jednu osu. Při vzorkovací frekvenci 100Hz

dosáhneme času právě 30,72 s. Pro delší čas měření se musí zvolit nižší vzorkovací frekvence dat, například 50Hz, které pak odpovídá čas 61,48s atp.

Výstupní vzorkovací frekvence akcelerometru může být nastavena od 1,56Hz až do 800Hz. Defaultně je nastavena frekvence 800Hz a vzorkování je řízeno mikrokontrolérem. Ten pomocí cyklického přerušení provádí periodické dotazování na registr akcelerometru „Data Status Register“ na adrese 0x00. Jestli jsou nová data z os připravena ke čtení. Vstupní parametr pro funkci periodického přerušení je čas udávaný v milisekundách, jehož obrácená hodnota odpovídá vzorkovací frekvenci.

V principu se po vyvoální přerušení, pošle zpráva pro čtení z registru 0x00 a pokud je nastaven Bit3 „ZYXDR“ na log. 1, jsou nová data připravena pro čtení. Následkem může být zaslána posloupnost zpráv dotazující se na data šesti registrů os X,Y a Z. Výhodou tohoto volání je, že se zamezí neplátného čtení dat z akcelerometru, pokud nejsou data k dispozici.

Data Status registr 0x00 (pouze pro čtení)

Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
ZYXOW	ZOW	YOW	XOW	ZYXDR	ZDR	YDR	XDR

Tabulka 2– ukázka registru Data Status[6]

```

/* New data XYZ available? */
if(iic_test_result[iic_test_index].user_id == 0x1DDD0001)
{
    data_flag = (uint8_t)iic_test_result[iic_test_index].reg_data;
    data_flag = data_flag & 0x08;
    data_flag = data_flag >> 3;
    if (data_flag == 1) // detection of flag
    {
        data_flag = 0; // delete flag
        data_rdy = iic_read_axis(); // call axis read function
    }
}

```

Pokud se v návratovém zásobníku objeví zpráva s ID = 0x1DDD0001, tak se jedná o odpověď na dotaz, jestli jsou nová data připravena ke čtení. Bitovým AND se vybere jen Bit3 a následně se zarovná doprava. Poté se porovná s hodnotou log. 1. Následně jestli se shoduje, tak to znamená, že jsou data připravena a zavolá se funkce pro čtení dat z os X, Y a Z.

5.5 Manipulace s daty

Data z akcelerometru pro každou osu X, Y a Z jsou čtena po dvou bajtech na jednu osu v podobě horních osmi bitů MSB a spodních osmi bitů LSB. Ve spodních LSB bitech je uloženo jen šest bitů dat a dva prázdné bity. Výsledkem je čtrnáctibitová hodnota rozdělena na dva osmibitové bajty.

Pro další zpracování dat je důležité data správně převést do jednoho šestnáctibitového znaménkového čísla, kde nejvyšší bit určí znaménko čísla. Nejvhodnější je zvolit datový formát znaménkový integer (int16_t).

Word Format	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
MMA8451Q 14b	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	x	x
Integer/Fraction	±	I	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	x	x
MSB/LSB	M	M	M	M	M	M	M	M	L	L	L	L	L	L	0	0

Tabulka 3 – ukázka hodnot v 16-bitovém čísle[6]

Ukázka kódu přepočtu MSB bitu a LSB bitu na jedno 16-ti bitové číslo a detekce plné vnitřní paměti.

```

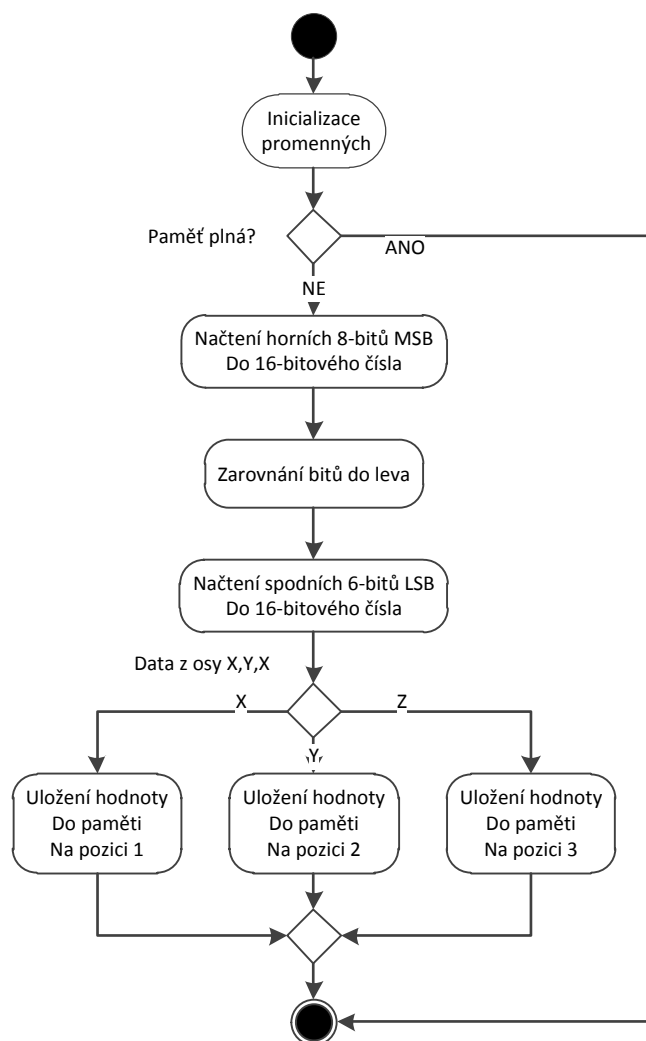
if(data_cnt == SIZE) //detection of full internal memory
{
    data_cnt = 0; //reset index counter
    return 1;
}

switch(Axis_Phase)
{
    case AXIS_X:
        result16 = (uint16_t) MSB_8 << 8; // MSB move to left
        result16 = result16 | (uint16_t)LSB_8; // OR LSB with result16
        Data[data_cnt] = (int16_t)result16; //data storage
        data_cnt++;
        break;

    case AXIS_Y:... }

```

Nejprve se provede detekce stavu vnitřní paměti, pokud není plná, může se pokračovat v ukládání dat. Následně se rozhodne, ze které osy jsou data načtena. Poté se provede zkopírování horních osmi MSB bitů do šestnácti bitového čísla. Bity se zarovnají doleva a provede se bitový posun o osm míst. Následně se přidá spodních šest LSB bitů. V poslední řadě se hodnota uloží do interní paměti „Data“ a inkrementuje se index o jedna. Data jsou ukládána ve vektorové paměti a v pořadí periodicky se opakujícím X, Y, Z, X, Y... až do naplnění paměti 9216 vzorky.



Obrázek 22 – diagram manipulace s daty

5.6 Struktura programu MAIN

- Inicializace **intc_init** – nastavení vektoru přerušení IRQ.
- Inicializace **mc_init** – nastavení hodinových taktů mikrokontroléru a taktů jednotlivých sběrnic.
- **mc_me_mode_change** – zapne takt procesoru a nastaví fázový závěs na frekvenci 60MHz.
- Inicializace **siul_init** – nastavení pinů jako vstupních nebo výstupních, zároveň se nastaví do počátečního stavu, pokud jsou nastaveny jako výstupní, log. 1 nebo log. 0.
- Inicializace **pit_init** – nastavení časovače periodického přerušení.
- Inicializace **iic_init** – nastavení sběrnice I²C. Nastavení přenosové rychlosti a adresy cílového zařízení.
- **blinker_init** – nastaví a zapne led diody pro blikání podle PIT časovače.

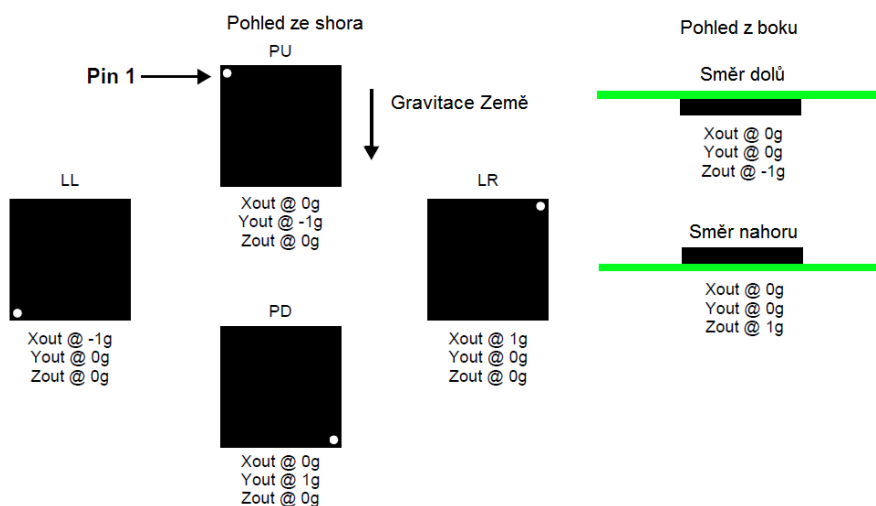
- **iic_init_accelerometer** – pošle dotaz na registr akcelerometru „Who am I“ a zjistí, jestli je akcelerometr k dispozici. Nastaví akcelerometr do konfiguračního módu, podle potřeby se nastaví a poté se přepne do aktivního módu.
- **polling_data_init** – nastaví časovač PIT s parametrem (vzorkovacího času dat z akcelerometru). Pošle zprávu na registr akcelerometru, jestli jsou nová data k dispozici pro čtení. Pokud akcelerometr vrátí odpověď log. 1, tak funkce zavolá rutinu pro čtení zpráv z registrů všech os. Tento děj se opakuje v intervalech podle vzorkovacího času.
- V periodickém cyklu **while** se nachází detekce stisknutí tlačítek 1, 2 a 3, kde se po stisku pošle zpráva pro nastavení akcelerometru do konfiguračního módu, poté se pošle zpráva pro přenastavení měrného rozsahu $2g = 1$ tlačítko, $4g = 2$ tlačítko, $8g = 3$ tlačítko. Rovněž je nutné přepnout akcelerometr do aktivního módu.

6 Analýza naměřených dat

V této kapitole je popsáno provedené měření a následný postup analýzy a porovnání naměřených dat z akcelerometru.

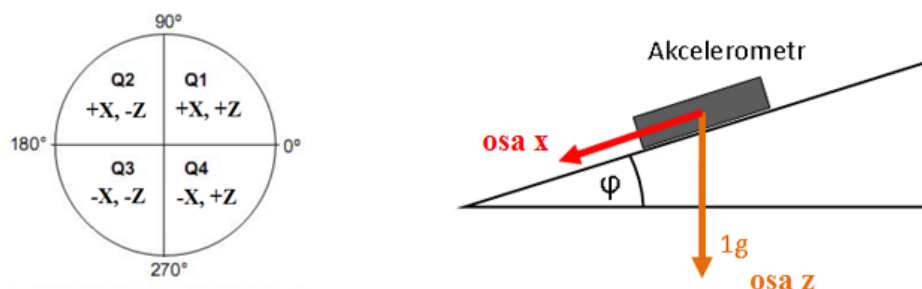
6.1 Statické zrychlení

S akcelerometry je možné měřit dva druhy zrychlení, statické a dynamické. Statické zrychlení je způsobeno tíhovým působením země tzv. gravitační tíhové zrychlení. Tíhové gravitační zrychlení značí se písmenem g a je důsledkem tíhové síly a odstředivého zrychlení Země. Hodnota g závisí na zeměpisné šířce. Mezinárodně dohodnutá a uznávaná hodnota velikosti je naměřená u hladiny moře a činí $9,80665 \text{ m.s}^{-2}$. V zeměpisné šířce České republiky je průměrné gravitační zrychlení $9,81341 \text{ m.s}^{-2}$, avšak není homogenní. [17]



Obrázek 23 – orientace akcelerometru v prostoru[10]

Pokud se bude akcelerometr nacházet vodorovně, na ose Z naměříme přibližně 1g, když ho obrátíme vzhůru tak -1g. Na osách X a Y bude zrychlení nulové. Pokud akcelerometr překloupíme na bok, na ose Z bude zrychlení nulové a na ose X 1g nebo X -1g, podle toho, zda bude na levém nebo pravém boku. Analogicky k tomu, převrácením k sobě nebo od sebe do polohy kolmo k zemi dosáhneme zrychlení 1g nebo -1g na ose Y. Rovněž pokud akcelerometr nakloníme jakkoliv vůči Zemi, bude ve všech osách rozloženo gravitační zrychlení v poměru podle náklonu. Z přepočtu pak můžeme určit jaký úhel, svírají osy mezi sebou. Orientaci akcelerometru lze nejlépe znázornit graficky, včetně přepočtu na jednotkovou kružnici s příslušnými úhly.[17]



Obrázek 24 – náklon akcelerometru

Z goniometrických funkcí stanovíme rovnice pro úhly vektorů svírající mezi sebou, z nichž vyjádříme rovnici pro velikost úhlu z poměru rozložení síly gravitačního zrychlení. [1]

$$\sin \varphi = A_x$$

$$\cos \varphi = A_z$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_x}{A_z} \quad \Rightarrow \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{A_x}{A_z}$$

A_x, A_z výchylka statického zrychlení.

φúhel mezi osy X a Z.

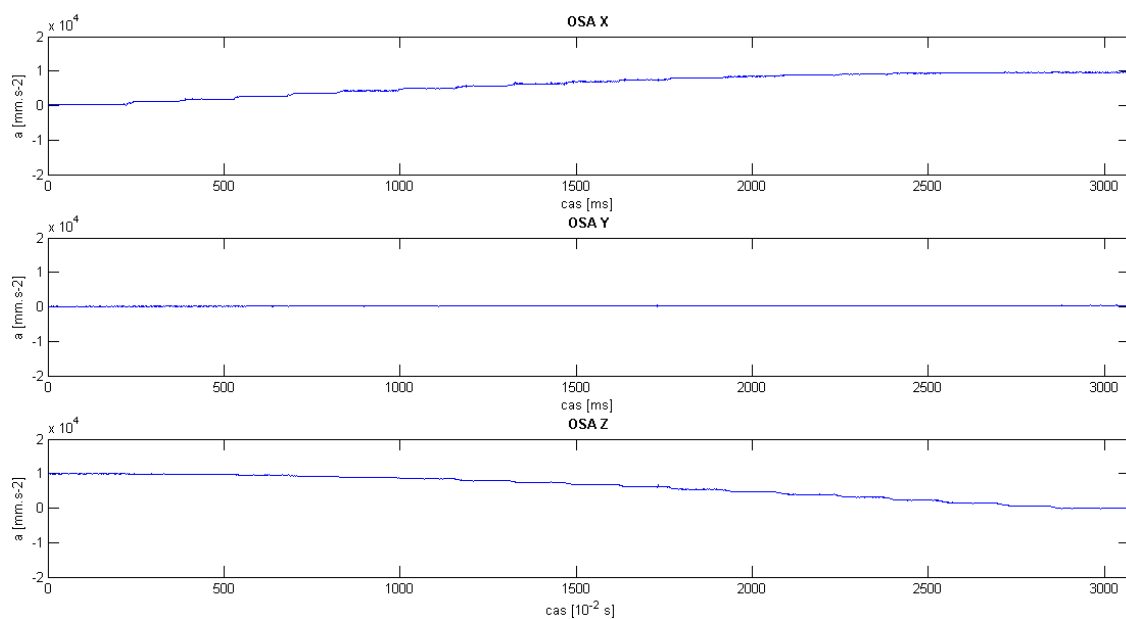
6.2 Měření náklonu z 90° do 0°

Měření náklonu z 90° do 0° bylo prováděno na přípravku s úhloměrem. Měření probíhalo ve směru hodinových ručiček po kroku 5° v intervalu 3s. Tomu odpovídá v ose X postupné přetočení z 0g na +1g a v ose Z přetočení z +1g na 0g. V tabulce je zobrazena odchylka obou měření.

Čas [s]	Naměřený úhel [°]	Přepočítaný úhel [°]	Odchylka [°]
0	0	2,087	-2,087
3	5	7,294	-2,294
6	10	10,58	-0,58
9	15	15,5	-0,5
12	20	20,92	-0,92
15	25	25,72	-0,72
18	30	30,37	-0,37
21	35	35,28	-0,28
24	40	40,56	-0,56
27	45	45,18	-0,18
30	50	50,4	-0,4
33	55	55,48	-0,48
36	60	60,5	-0,5
39	65	65,44	-0,44
42	70	70,52	-0,52
45	75	75,9	-0,9
48	80	81,3	-1,3
51	85	86,4	-1,4
54	90	90,57	-0,57

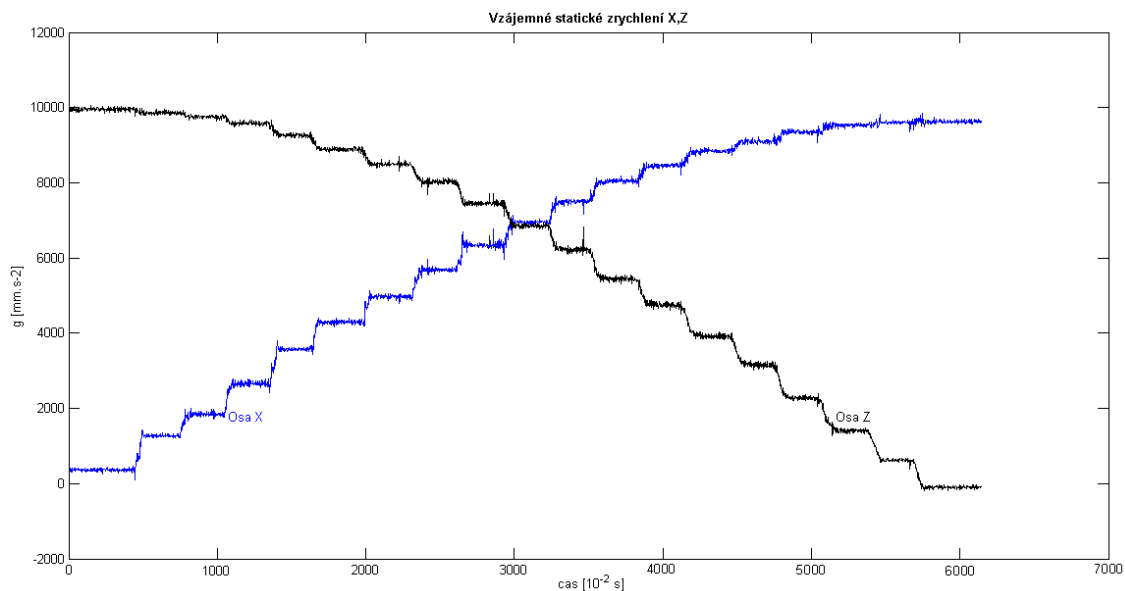
Tabulka 4 – Naměřené a přepočítané hodnoty 0° až 90°

Porovnáním hodnot měřeného náklonu na přípravku s úhloměrem vůči měření náklonu akcelerometrem byla odečtením obou hodnot stanovena odchylka. Průměrná velikost odchylky činila -0,83°. Z čehož plyne, že měření akcelerometrem vykazovalo stále kladnou chybu okolo 1°. Toto měření mělo za úkol dokázat, že tříosé akcelerometry jsou schopny s určitou přesností měřit náklon vůči gravitačnímu zrychlení Země.



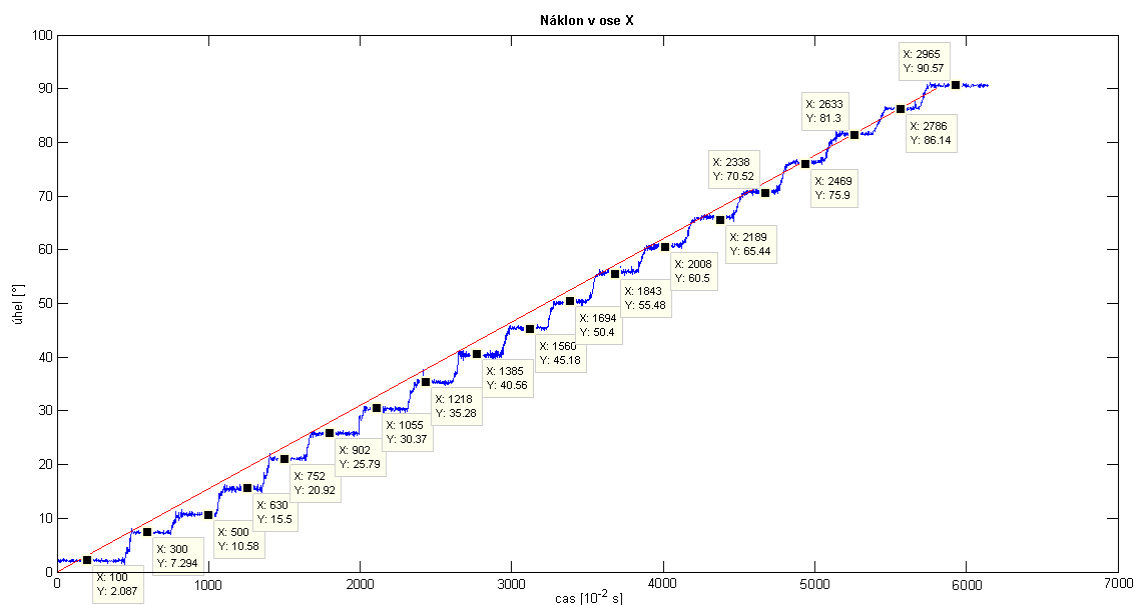
Obrázek 25 – graf otočení o 90° ve všech osách

Z grafu je patrná změna v ose X, která nabývá hodnot přibližně od 0 do hodnoty $9,81\text{m.s}^{-2}$, což odpovídá gravitačnímu zrychlení Země. Na osu Y nepůsobí téměř žádné zrychlení, protože přípravek je otáčen pouze v ose X. Přípravek je na začátku měření ve vodorovné poloze tak, že osa Z je kolmo se Zemí, potom nabývá hodnot maximálního gravitačního zrychlení kolem $9,81\text{m.s}^{-2}$ až postupně do nuly.



Obrázek 26 – graf vzájemné změny statického zrychlení v ose X a Z

Z grafu vzájemné změny statického zrychlení v ose X a Z je vidět působení gravitačního zrychlení g , v časovém intervalu po 3 sekundách. Z grafu je dále vidět prolínání os, z čehož vyplývá, že absolutní hodnota součtu obou os v ustáleném klidném stavu je vždy rovna gravitačnímu zrychlení g . Navíc je možné vidět překmity zrychlení při nastavení na jiný úhel, protože při posunu dochází ke zrychlení.



Obrázek 27 – graf naměřeného průběhu náklonu po kroku 5°

V grafu naměřeného průběhu náklonu na ose y jsou zobrazeny naměřené a přepočítané hodnoty úhlu náklonu akcelerometru osy X. Na ose x je průběh měřeného času. Měření bylo prováděno po pravidelných časových intervalech 3s viz modrá křivka. Červená přímka zobrazuje lineární průběh měření v čase z 0° do 90°. Měření neprobíhalo striktně lineárně a zároveň s omezenou přesností přípravku, tedy průběh naměřených úhlů se neprotíná vždy s lineární hodnotou náklonu.

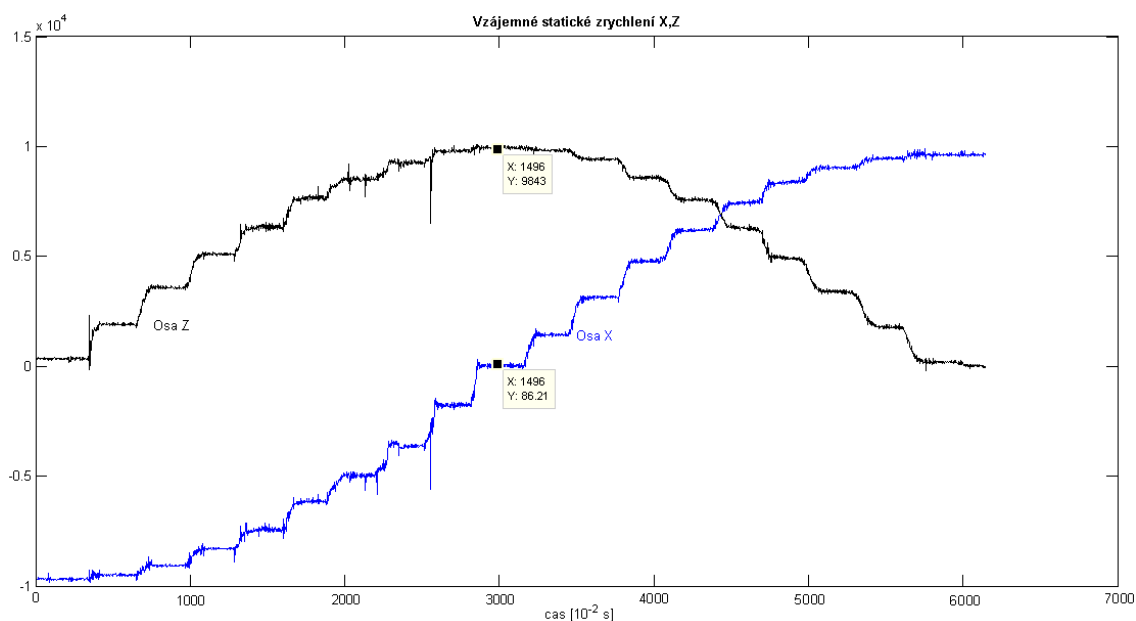
6.3 Měření náklonu z -90° do 90°

Měření náklonu z -90° do 90° bylo prováděno na přípravku s úhloměrem. Jednalo se tedy o posun z 0° do 180° . Měření probíhalo ve směru hodinových ručiček po kroku 10° v intervalu 3s. Tomu odpovídá v ose X postupné přetočení z $-1g$ na $+1g$ a v ose Z přetočení z $+1g$ na $-1g$.

Čas [s]	Naměřený úhel [°]	Přepočítaný úhel [°]	odchylka [°]
0	-90	-87,93	-2,07
3	-80	-78,22	-1,78
6	-70	-68,99	-1,01
9	-60	-58,15	-1,85
12	-50	-50,39	0,39
15	-40	-39,44	-0,56
18	-30	-30,39	0,39
21	-20	-20,83	0,83
24	-10	-10,03	0,03
27	0	0,028	-0,028
30	10	8,63	1,37
33	20	18,89	1,11
36	30	30,06	-0,06
39	40	39,59	0,41
42	50	50,22	-0,22
45	60	59,76	0,24
48	70	69,7	0,3
51	80	79,94	0,06
54	90	89,29	0,71

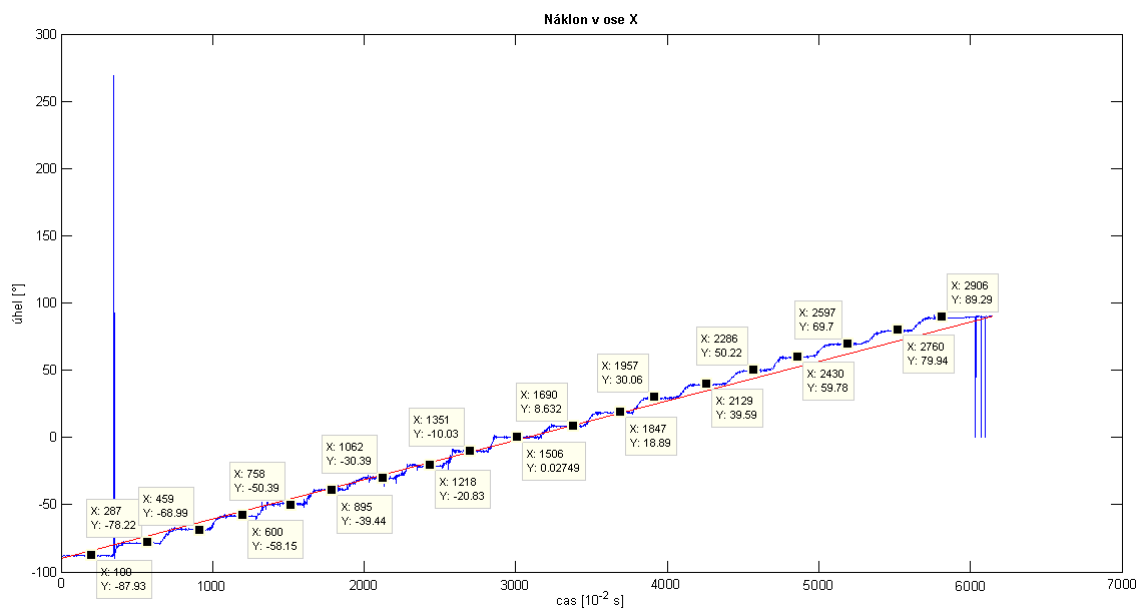
Tabulka 5 - naměřené a přepočítané hodnoty -90° až 90°

Porovnáním hodnot měřeného náklonu na přípravku s úhloměrem vůči měření náklonu akcelerometrem byla odečtením obou hodnot stanovena odchylka. Průměrná velikost kladné odchylky byla průměrem stanovena na $+0,58^\circ$ a na zápornou odchylku $-0,95^\circ$. Z čehož plyne, že měření akcelerometrem vykazovalo jak zápornou, tak kladnou chybu, tedy výsledná chyba je dána absolutním součtem obou odchylek, což je $1,5^\circ$. Toto měření mělo rovněž za úkol dokázat, že tříosé akcelerometry jsou schopny s určitou přesností měřit náklon vůči gravitačnímu zrychlení Země.



Obrázek 28 – graf vzájemné změny statického zrychlení v ose X a Z

Vzájemné statické zrychlení os X a Z, zobrazuje překlápění akcelerometru o 180°. Funkce osy Z odpovídá půlperiodě funkce sinus a průběh osy X odpovídá půlperiodě funkce kosinus. Celé periodě by odpovídalo otočení o 360°. Osa Y je rovněž jako v předchozím měření v nule, protože statické zrychlení na ni nepůsobí.

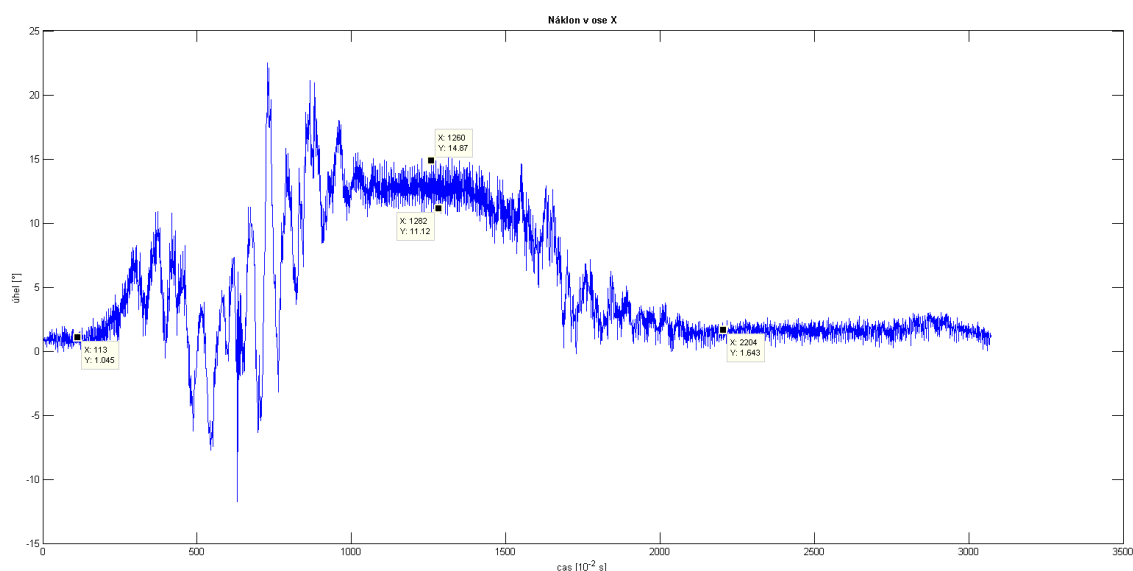


Obrázek 29 - graf naměřeného průběhu náklonu po kroku 10°

V grafu na ose y jsou zobrazeny naměřené a přepočítané hodnoty úhlu náklonu akcelerometru osy X. Na ose grafu x je průběh měřeného času. Měření bylo prováděno po pravidelných časových intervalech 3s viz modrá křivka. Červená přímka zobrazuje lineární průběh měření v čase z -90° do 90° . Měření neprobíhalo striktně lineárně a zároveň s omezenou přesností přípravku, tedy průběh naměřených úhlů se neprotíná vždy s lineární hodnotou náklonu.

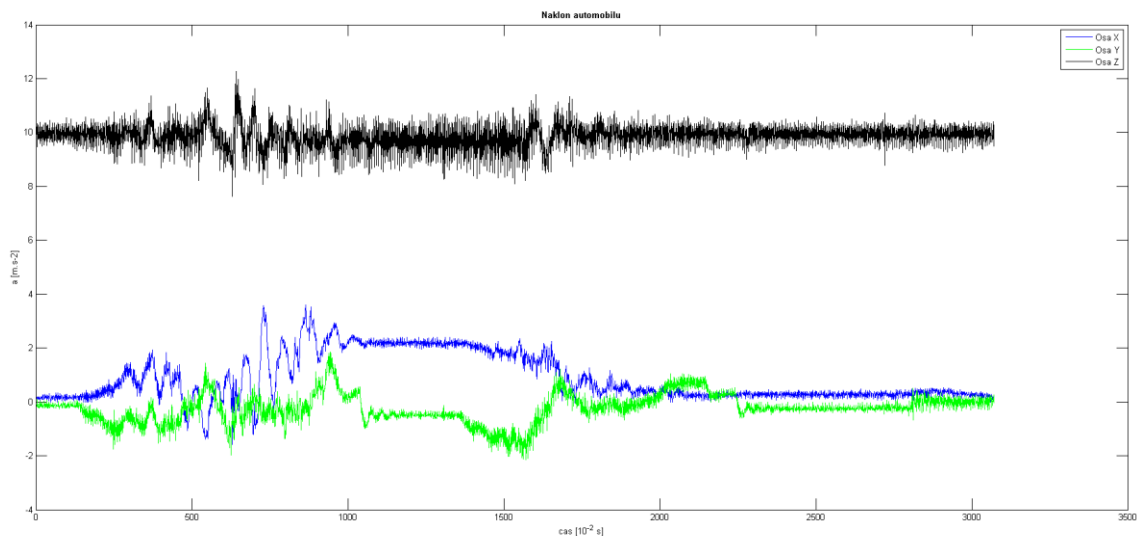
6.4 Měření náklonu automobilu

Měření bylo provedeno ze stacionární vodorovné polohy vozidla uvedeného do pohybu. Automobil postupně najel na obě levé nápravy na břeh. V šikmé poloze vozidlo zastavilo asi na 5s a poté sjelo zpět do vodorovné polohy, kde zastavilo.



Obrázek 30 – graf náklonu automobilu v ose X ve $^\circ$

Z grafu je vidět přepočítaný poměr gravitačního zrychlení g v osách X a Z na úhel náklonu automobilu. Při nájezdu na břeh auto kolísalo, což je vidět v přechodech v čase od 5s do 10s. Z čehož vyplývá, že měření úhlu náklonu má význam při malých rychlostech nebo při zastavení vozidla. Měření náklonu vozidla je ovlivněno šumem, způsobeným vibracemi motoru aplikované v ose Z. Naměřené a přepočítané hodnoty náklonu byly v rozmezí od $11,1^\circ$ do $14,8^\circ$. Průměrně bylo auto ve sklonu asi 13° vůči působení zemské gravitace.

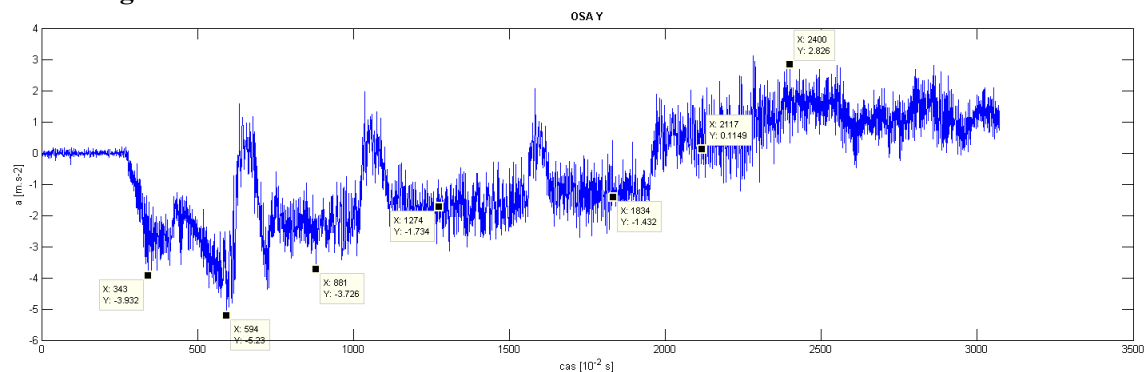


Obrázek 31 – graf zrychlení automobilu při měření náklonu všech osách

6.5 Měření akcelerace

Při tomto měření jsem zkoumal akceleraci v automobilu pro tři rozsahy akcelerometru na stejné testovací dráze. Měření probíhalo z klidu, tedy z 0 km.h^{-1} do rychlosti 100 km.h^{-1} . Navíc jsem měřil čas, za jak dlouho se auto dostane postupně od startu po 20 km.h^{-1} až do 100 km.h^{-1} . Hodnoty akcelerace dosahují záporných hodnot, což je dáno polarizací akcelerometru vůči směru jízdy. Orientace os akcelerometru při měření z pohledu řidiče je osa +Y ve směru jízdy, -Y je proti směru jízdy, osa +X je směřována na pravou stranu a osa -X na levou stranu. V ose +Z je kladná velikost gravitačního zrychlení g , opačným směrem je osa -Z.

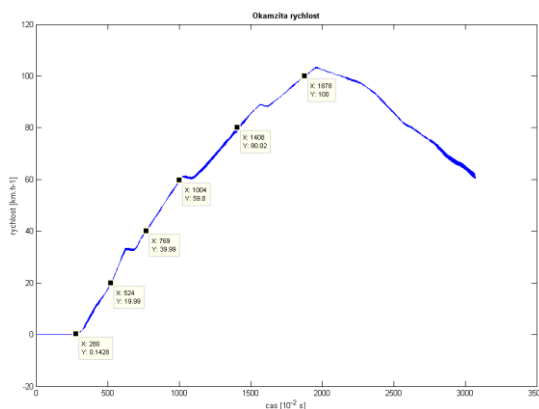
6.5.1 2g rozsah



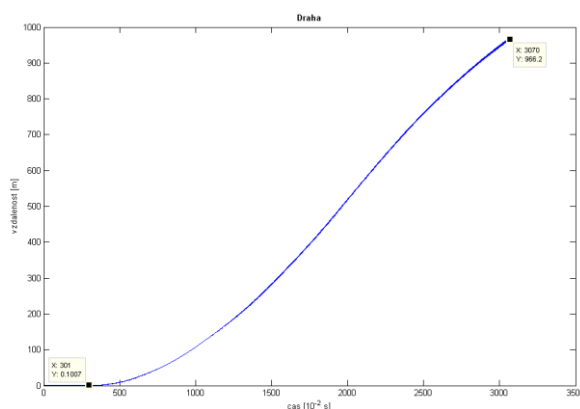
Obrázek 32 – graf zrychlení automobilu v ose Y na rozsahu 2g

Rozsah 2g						
Rychlost [km.h-1]	0	20	40	60	80	100
Čas stopky [s]	2,6	6,7	8,3	9,8	13,3	17,9
Čas z grafu [s]	2,8	5,24	7,69	10	14	18,8
Rozdíl [s]	-0,2	1,46	0,61	-0,2	-0,7	-0,9

Tabulka 6 – srovnání naměřených a z grafu odečtených hodnot času 2g

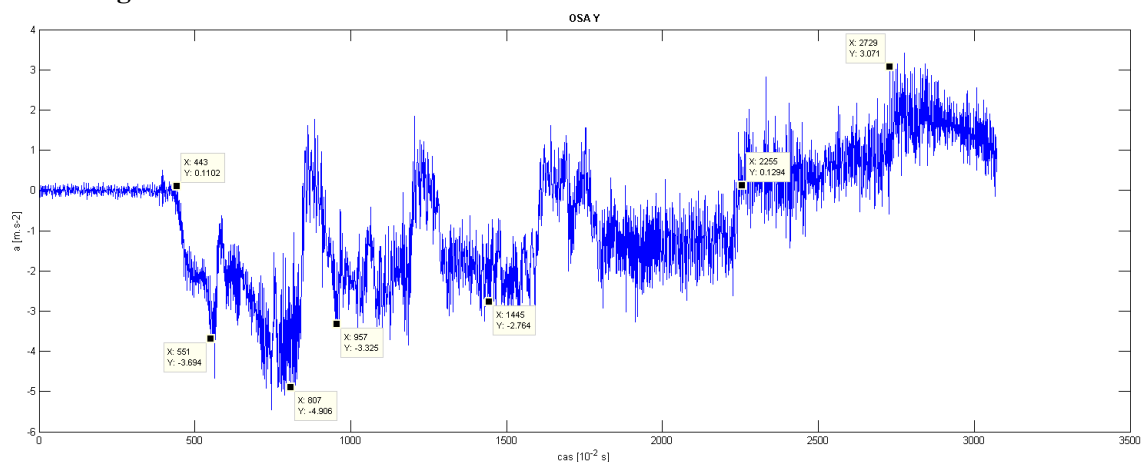


Obrázek 33 – graf okamžité rychlosti



Obrázek 34 – graf přepočítané dráhy

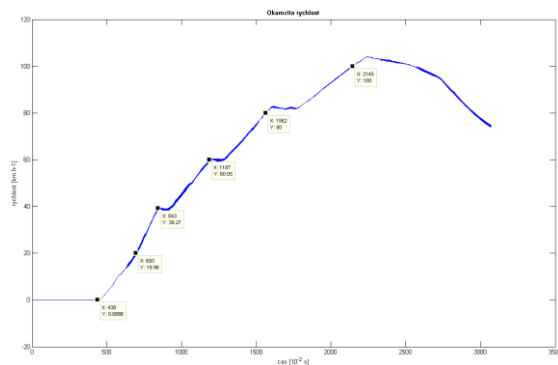
6.5.2 4g rozsah



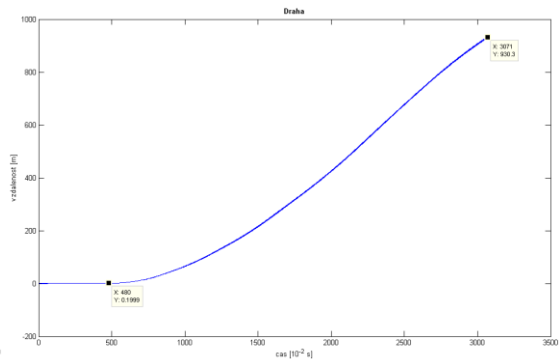
Obrázek 35 – graf zrychlení automobilu v ose Y na rozsahu 4g

Rozsah 4g						
Rychlost [km.h-1]	0	20	40	60	80	100
Čas stopky [s]	4	7,3	8,7	10,5	14,5	20
Čas z grafu [s]	4,4	6,9	8,4	11,9	15,6	21,5
Rozdíl [s]	-0,4	0,4	0,3	-1,4	-1,1	-1,5

Tabulka 7 – srovnání naměřených a z grafu odečtených hodnot času 4g

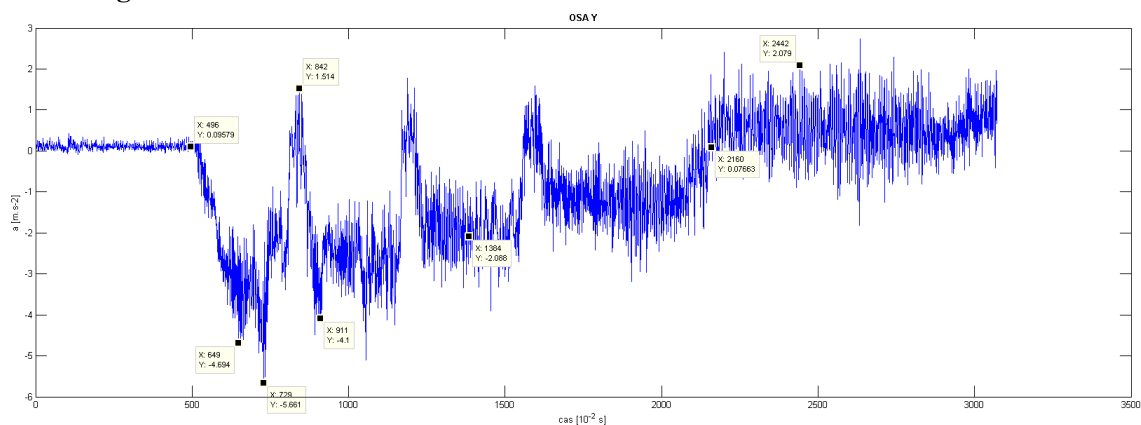


Obrázek 36 – graf okamžité rychlosti



Obrázek 37 – graf přepočítané dráhy

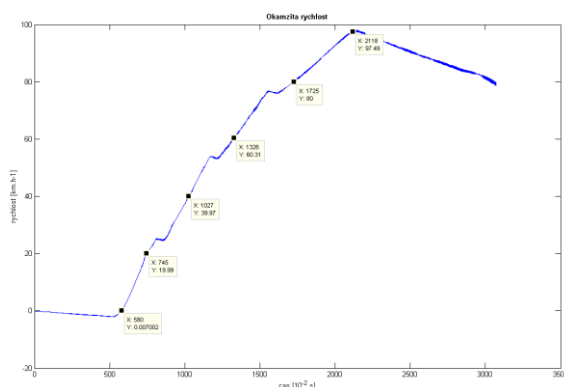
6.5.3 8g rozsah



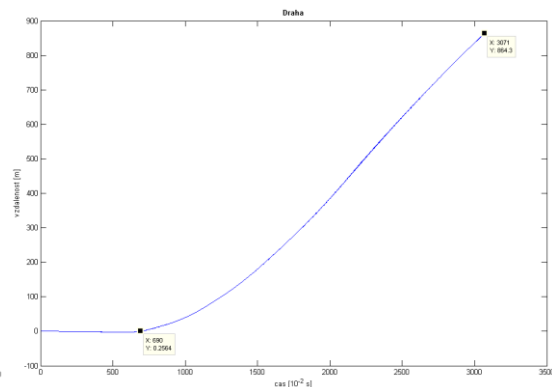
Obrázek 38 – graf zrychlení automobilu v ose Y na rozsahu 8g

Rozsah 8g						
Rychlost [km.h-1]	0	20	40	60	80	100
Čas stopky [s]	4,5	7	9,5	12	15,2	18,9
Čas z grafu [s]	5,8	7,5	10,3	13,3	17,3	21,2
Rozdíl [s]	-1,3	-0,5	-0,8	-1,3	-2,1	-2,3

Tabulka 8 – srovnání naměřených a z grafu odečtených hodnot času 8g



Obrázek 39 – graf okamžité rychlosti



Obrázek 40 – graf přepočítané dráhy

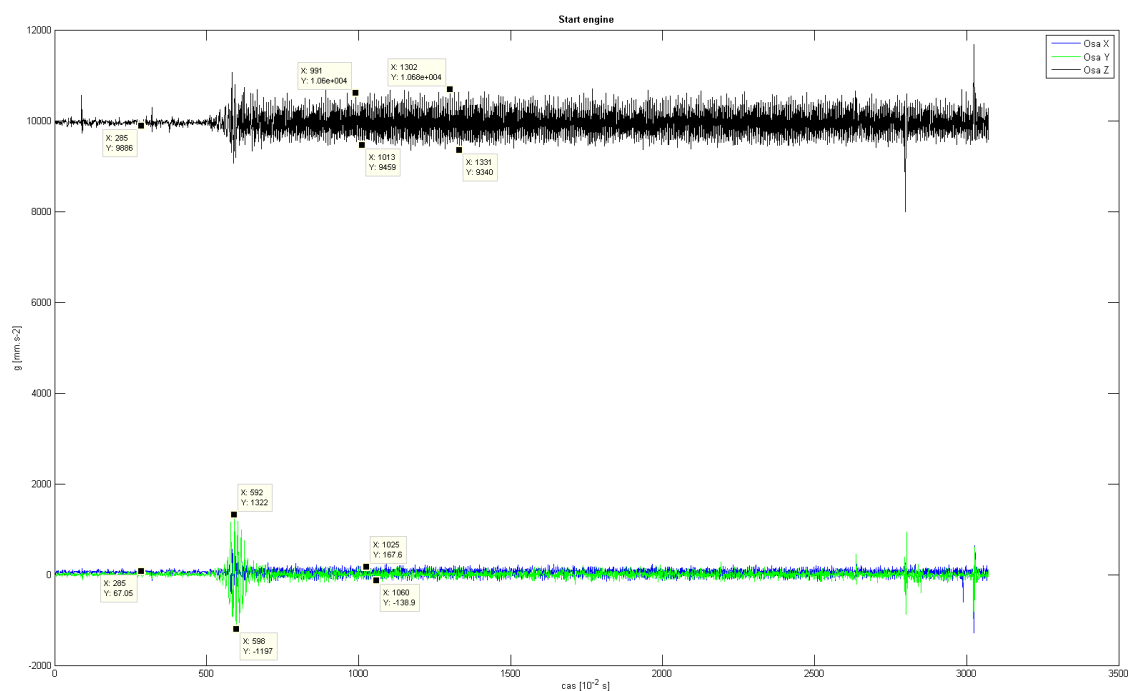
Při porovnání všech měření lze říci, že maximální dosažená výchylka dynamického zrychlení byla do $\pm 1g$. Tedy pro základní popis kinematických dějů v automobilu dostačuje rozlišení $\pm 2g$. Rozdíly v záznamu akcelerace byly minimální.

Paradoxem je, že při numerické integraci akcelerace na vzdálenost bylo rozlišení $\pm 8g$ nejpřesnější vzhledem ke vzdálenosti změřené na mapě. To je způsobeno integrací na méně citlivém rozsahu, což znamená méně chyb při integraci způsobeným překmity a otřesy.

6.6 Měření vibrací a otřesů

Při jízdě automobilem dochází k vibracím způsobené motorem vozidla anebo k otřesům způsobeným nerovnostmi povrchu vozovky. Pomocí akcelerometru je možné tyto vibrace a otřesy měřit. Přesnost měření závisí na upevnění akcelerometru ve vozidle a kvalitě rozlišení akcelerometr a s tím související vzorkovací frekvence.

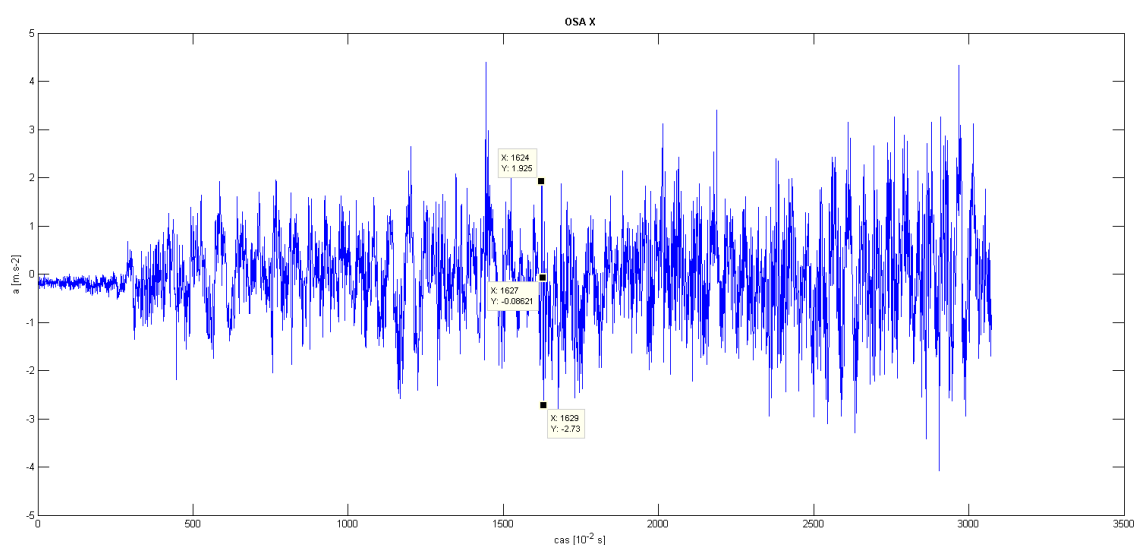
Při prvním měření jsem zaznamenal nastartování motoru vozidla při setrvání vozidla v klidu. Měření bylo provedeno na nejmenším rozsahu akcelerometru $\pm 2g$, tedy na nejvyšší citlivosti. Vzorkovací frekvence byla 100Hz. Z čehož vyplývá, že měření vibrací má podle Shannon-Kotělnikova teorému smysl pouze pro frekvence menší než 50Hz. Z grafu je možné odečíst velikosti šumového signálu způsobeného vibrací motoru.



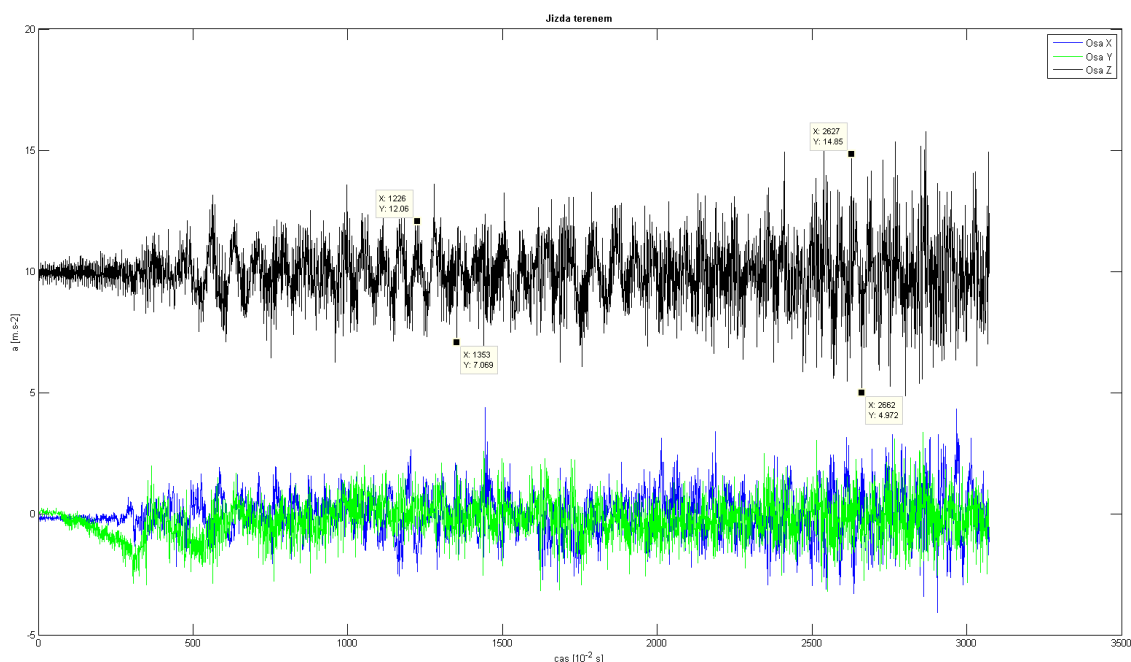
Obrázek 41 – graf měření úrovně vibrace při nastartovaném motoru

V grafu je vidět patrný rozdíl velikosti úrovní vibrací mezi jednotlivými osy. V ose Z probíhá horizontální vibrace, která je značně větší než vertikální v osách X a Y.

Na dalším grafu jsou vidět otřesy automobilu způsobené vlivem velmi špatného povrchu vozovky. Změna zrychlení se projevuje nejvíce v osách Z a X. Tyto otřesy způsobovaly jámy na vozovce, což odpovídá nejvíce pohybu nahoru, dolů a do stran s automobilu. Dopředné zrychlení není výrazné, protože jízda byla pomalá.



Obrázek 42 – graf otřesů na špatné vozovce v ose X

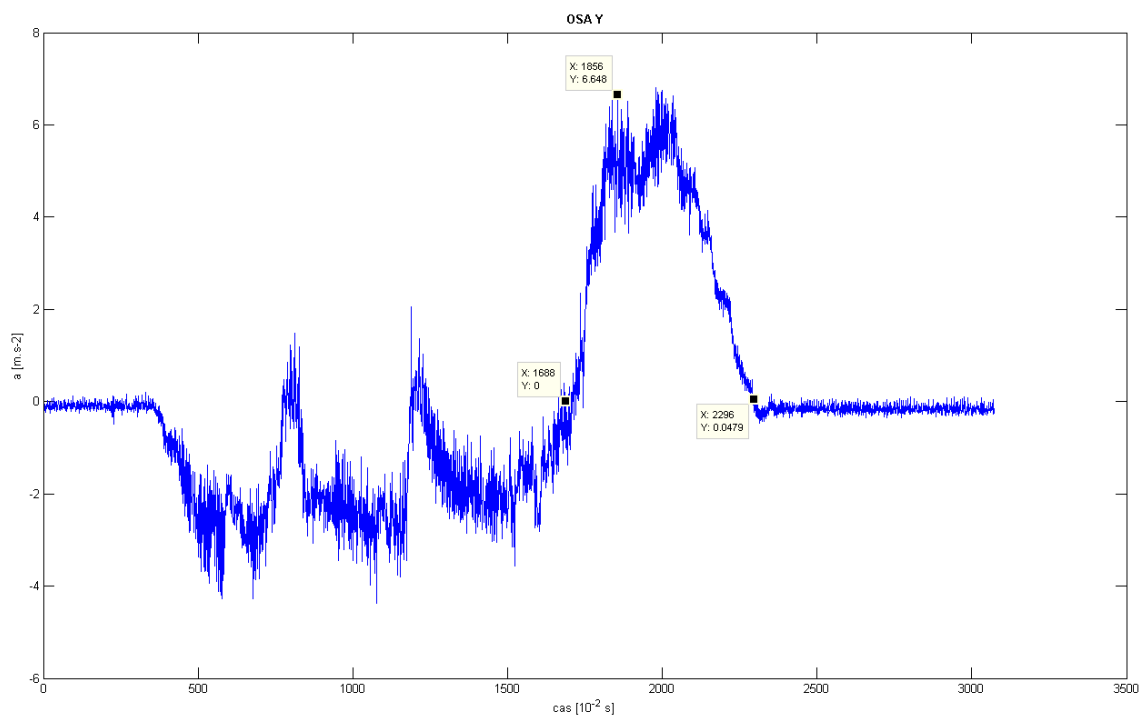


Obrázek 43 – graf otřesů na špatné vozovce ve všech osách

Vlivem velkého znehodnocení dat způsobeného velkými překmity nelze vypočítat rychlost ani uražená dráha automobilem. Z toho vyplývá, že pokud je špatný stav vozovky, tak je přepočít na jiné kinematické veličiny velmi nepřesný.

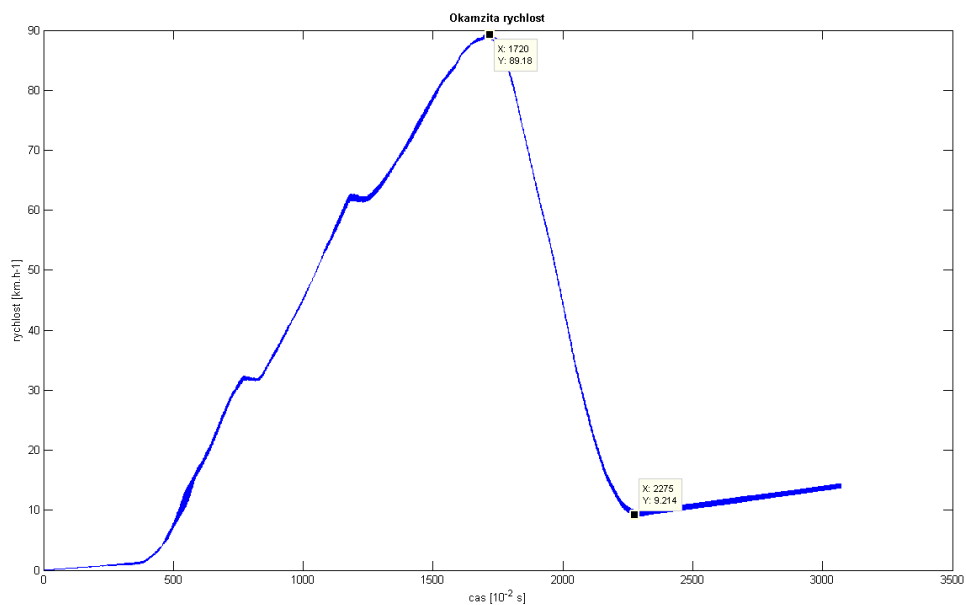
6.7 Měření brzdění

Měření brzdění je v podstatě měření zrychlení s opačnou orientací směru vůči pohybu. V podstatě se jedná o měření zpomalení. V našem případě auto zrychlovalo z klidu, tedy z 0 km.h^{-1} do rychlosti 80 km.h^{-1} a poté prudkým brzděním auto zpomalilo až do nuly. Záporné zrychlení z grafu odpovídá zrychlování dopředu. V čase asi 6s a 11s je vidět kladné zrychlení, které odpovídá řazením rychlostních stupňů. Kladné zrychlení odpovídá zpomalení. V čase asi 17s došlo k brzdění a hodnota zpomalení dosáhla v maximu $6,65 \text{ m.s}^{-2}$.



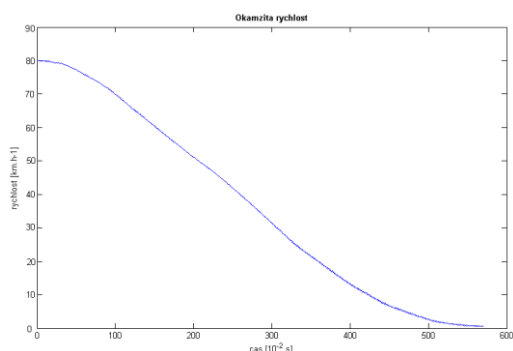
Obrázek 44 – graf zobrazení prudkého brzdění

Numerickou integrací průběhu získáme graf okamžité rychlosti. Vlivem integrace hodnot a jejich přepočtu vznikla chyba. Tu způsobuje zejména integrace překmitů při řazení a působení šumu. Chybový rozdíl činil $9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, to se projevilo v maximální hodnotě rychlosti a následně i při úplném zastavení. Hodnota přepočtu rychlosti nebyla na nulové hodnotě, ale právě v $9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

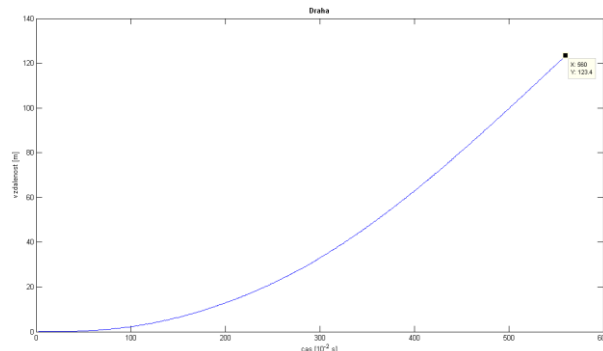


Obrázek 45 – graf okamžité rychlosti při brzdění

Numerickou integrací pouze brzdného úseku lze bez zatížení integrační chyby stanovit čas, za jak dlouho vozidlo zastavilo. Protože maximální integrovaná hodnota dosáhla přesně naměřené rychlosti 80 km.h^{-1} , můžeme říct, že přepočítání nebylo zatíženo integrační chybou. Druhou numerickou integrací od okamžiku začátku brzdění lze určit brzdnou dráhu vozidla.



Obrázek 46 – graf zpomalení

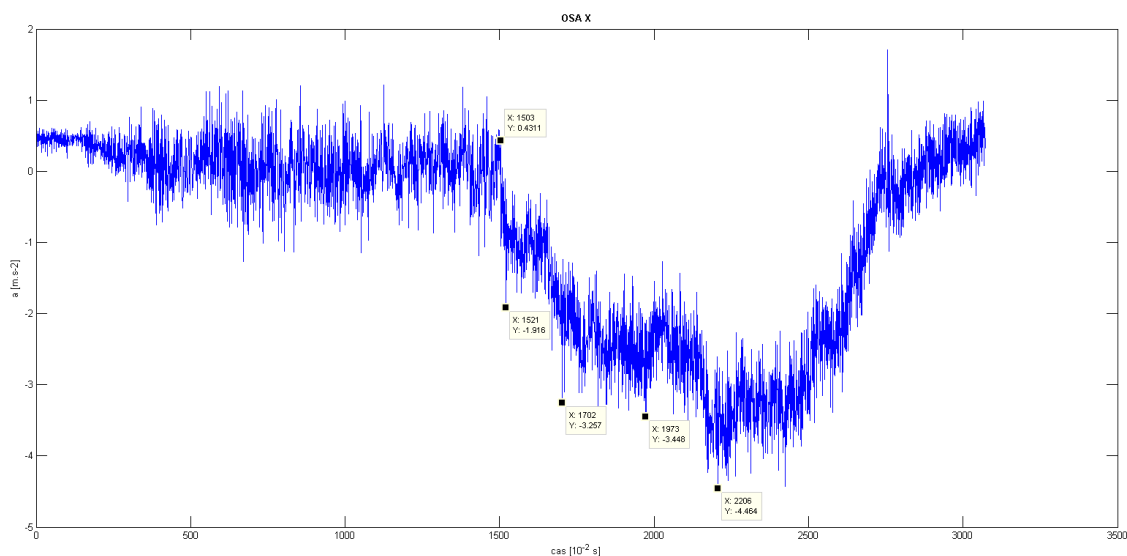


Obrázek 47 – graf brzdné dráhy

Vozidlo zastavilo z rychlosti 80 km.h^{-1} za čas 5,6s. Brzdná dráha při prudkém brzdění činila 123m.

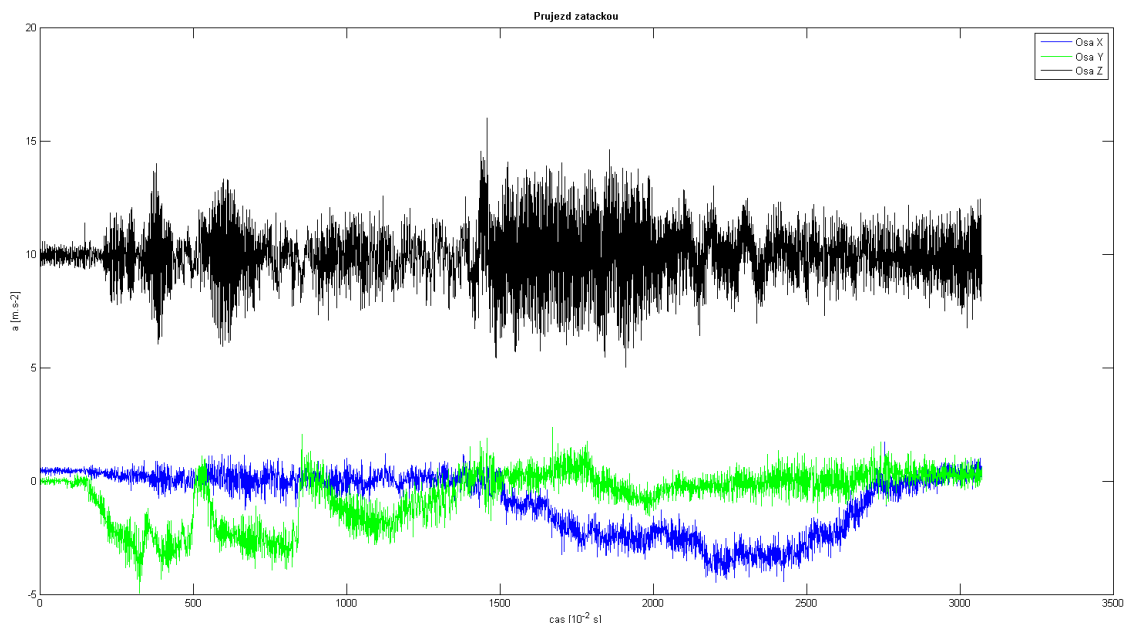
6.8 Měření průjezdu zatáčkou

Při průjezdu pravotočivou zatáčkou působí odstředivé zrychlení na osu X, podle toho jakou rychlostí je průjezd proveden. Na auto působí dva druhy zrychlení, tečné ve směru tečny vůči kopírované zatáčce a normálové ve směru pohybu vozidla.



Obrázek 48 – graf tečného zrychlení při průjezdu zatáčkou v ose X

Zeleně je zobrazen průběh dopředného zrychlení, v ose Y. Modře je zobrazen průběh odstředivého zrychlení osy X. V ose Z jsou zaznamenávány zejména povrchové nerovnosti vozovky.



Obrázek 49 – graf zrychlení při průjezdu zatáčkou ve všech osách

6.9 Parametry testovacího vozidla

- Ford Focus II kombi
- Typ paliva Diesel
- Typ motoru 1,8 TDCi
- Výkon motoru 85kW
- Manuální převodovka 5 stupňová

7 Závěr

V práci jsem zkoumal kinematické děje v automobilu. Cílem této práce bylo navrhnout měřicí systém zaznamenávající akcelerometrická data z automobilu a jejich následná analýza.

Výsledkem práce je vytvořená komunikace mezi mikrokontrolérem a akcelerometrem po vnitřní sběrnici I²C. Dále je vytvořen program pro nastavení a získávání dat z akcelerometru. Práce probíhala na vývojovém kitu Freescale TRK-MPC5604B s vytvořeným přípravkem pro zapojení akcelerometru Freescale MMA8451Q. Návrh elektrického schématu přípravku pro akcelerometr se odvíjí od doporučeného zapojení výrobce. Záznam měřených hodnot se provádí do vnitřní paměti mikrokontroléru. Pomocí vývojového prostředí CodeWarrior v módu debugování se data exportují do binárního souboru a uloží se do počítače. Programem Matlab jsou data rozdělena do jednotlivých os a přepočítána na rozměr zrychlení. Následně jsou data zpracována a vykreslena do grafů.

Pro ověření měření náklonu byly provedeny dvě úlohy měření. První měření bylo provedeno na zhotoveném přípravku s odečtem hodnot náklonu na úhloměru. Data z odečtu byla porovnána s daty naměřenými akcelerometrem. Druhé měření náklonu bylo provedeno v automobilu a přepočítáno na úhel náklonu automobilu vůči Zemi. Takového měření by šlo ve finální aplikaci uplatit zejména u terénních vozů. Takový systém by měřil a vyhodnocoval kritický boční náklon vozidla a varoval by řidiče, že by mohlo dojít k převrácení vozu. Dále by šlo vyhodnocovat nebezpečné klesání a stoupání terénu, na kterém se vůz nachází. To může upozornit řidiče na zvýšené riziko samovolného rozjetí zaparkovaného automobilu v kopci.

Měření dopředného zrychlení bylo testováno v reálném automobilu na rovném úseku vedlejší komunikace a pro více rozsahů akcelerometru. Zároveň byl prováděn odečet rychlosti na tachometru automobilu v čase, aby mohl být porovnán s výsledky měření akcelerometrem. Po přepočtu naměřeného zrychlení na rychlost byly data porovnány v čase. Porovnané výsledky se shodují s průměrnou přesností ± 1 s. Při zahrnutí nepřesnosti odečtu akcelerometru, stopek a chyb měření, je výsledek za účelem porovnání dostačující. Z výsledků porovnání měření dopředné akcelerace na různá rozlišení vyplývá, že zvolený rozsah neměl velký vliv na průběh naměřených hodnot. Rovněž bylo zjištěno, že pro popis standardních kinematických dějů v automobilu je rozlišení ± 2 g dostatečné, protože naměřené hodnoty zrychlení nepřesahovaly ± 1 g.

Měření vibrací a otřesů jsem nastínil další možnosti využití akcelerometru v automotive aplikaci. Pro různá odvětví spojená s automobilovým průmyslem by mohlo být využito měření akcelerometrem například pro určování komfortních vlastností automobilu nebo kvality povrchu vozovky.

V práci jsem zkoumal také určování brzdné dráhy z velikosti kladné akcelerace. To lze vypočítat pomocí dvojité integrace zrychlení v čase. Tento děj ukazuje rovněž čas potřebný k zastavení vozidla. V budoucím systému by mohl akcelerometr permanentně zaznamenávat data, která by se v případě kolize nebo havárie dala zpětně analyzovat. Systém by ve vozidle sloužil obdobně jako černá skříňka u letadel.

Práce slouží jako studie o možnostech využití akcelerometrických měření v automotive aplikaci.

Seznam použité literatury

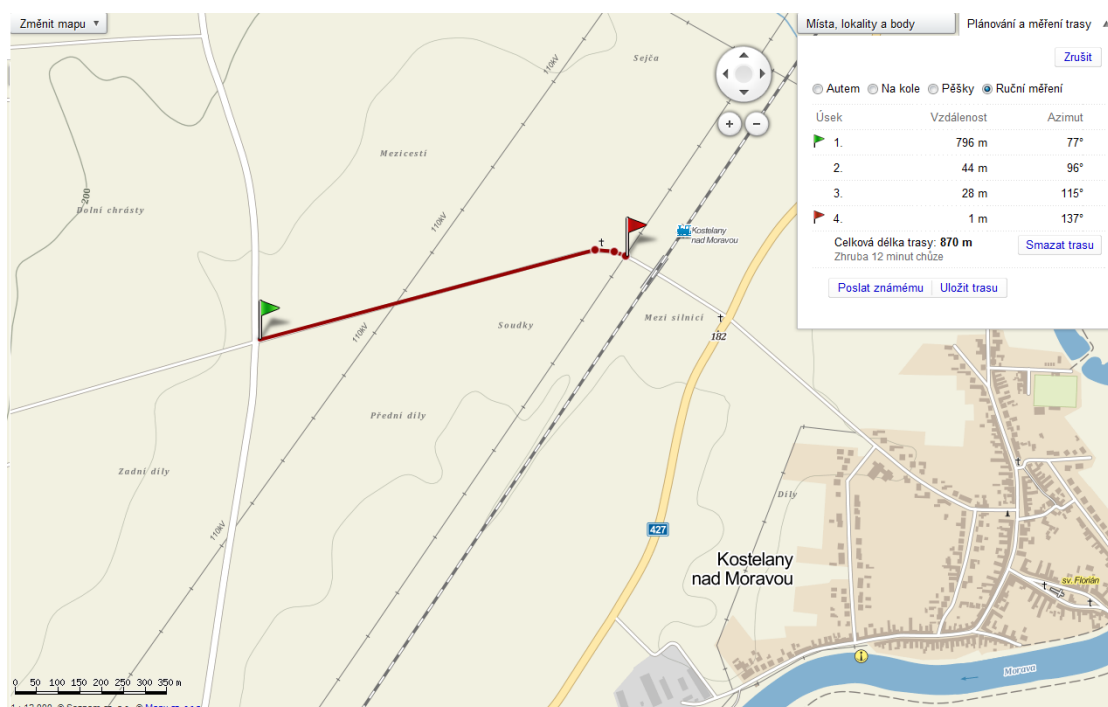
- [1] HALLIDAY, D., RESNICK, D., WALKER, J. *Fyzika - Vysokoškolská učebnice obecné fyziky* 1. Vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně / Nakladatelství VUTUM, 2000. ISBN 80-214-1868-0
- [2] ONDŘEJ KRUPA, *Vybrané numerické algoritmy*, datum publikace 2010, [Online]. [Datum citace 8. 7. 2013].
URL: <http://fsinet.fsid.cvut.cz/stretech/2010/stretech_2010_sbornik/pdf/1135.pdf>
- [3] *Procesory PowerPC - Historie a vývoj PowerPC* [Online].
Datum publikace 30. 10. 2004 [Datum citace 17. 1. 2013].
URL: <<http://powerpc.lukysoft.cz/procesory-powerpc-1-dil-historie-vyvoj-powerpc/>>
- [4] *MPC5604B/C*, Microcontroller Data Sheet. Freescale Semiconductor, Inc. 2011
- [5] TIŠNOVSKÝ, P. *Externí sériové sběrnice SPI a I²C* [Online]. Datum publikace 30. 12. 2008 [Datum citace 15. 1. 2013]. URL: <<http://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbornice-spi-a-i2c/>>
- [6] *Data Manipulation and Basic Settings of the MMA8451, 2, 3Q*, Application Note. Freescale Semiconductor, Inc. USA 2012
- [7] *LE00AB/C SERIES*, Datasheet. STMicroelectronics, Italy 2003
- [8] PRAUZEK, Michal. *Návrh metodiky měření EKG s redukováným počtem elektrod*. Ostrava, 2008. 53 s. Diplomová práce. VŠB-TUO.
- [9] *UM10204, I2C-bus specification and user manual*, NXP Semiconductors B.V. [Online]. Datum revize 9. 10. 2012 [Datum citace 4. 7. 2013].
URL: <http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf>
- [10] *MMA8451Q*, Datasheet. Freescale Semiconductor, Inc. USA 2013
- [11] *Acceleration Sensors*, [Online]. [Datum citace 4. 1. 2013]. URL: <http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/fact_sheet/MMASERIESFS.pdf?fsrch=1&WT_TYPE=Fact%20Sheets&WT_VENDOR=FREESCALE&WT_FILE_FORMAT=pdf&WT_ASSET=Documentation&sr=20/>
- [12] *Typy, druhy, varianty, označení paměťových karet*, [Online]. [Datum citace 4. 1. 2013].
URL: <<http://www.pametove-karty.info/i/4-pametove-karty-podle-oznaceni.html>>

- [13] ANTONÍN VOJÁČEK, *Jak pracují nové 3D MEMS akcelerometry Freescale ?* [Online]. Datum publikace 30. 4. 2007 [Datum citace 30. 6. 2013]. URL:<<http://www.hw.cz/soucastky/jak-pracuji-nove-3d-mems-akcelerometry-freescale.html/>>
- [14] ANTONÍN VOJÁČEK, *Principy akcelerometrů* [Online]. Datum publikace 9. 4. 2007 [Datum citace 26. 6. 2013]. URL: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2007040901/>>
- [15] *What is MEMS Technology?* [Online], [Datum citace 15. 2. 2013]. URL: <http://www.memsnet.org/mems/what_is.html/>
- [16] ANDERLE, K., GREGORI, E., STEFFEN, M., SNELL, D., *A Simple System to Develop and Test Sensor Algorithms* , [Online], [Datum citace 17. 1. 2013]. URL: <http://www.freescale.com/files/ftf_2010/Americas/FTF10_ENT_F0795_PDF.pdf/>
- [17] JOSEF NAVRÁTIL, *Arduino Nano a akcelerometr* [Online]. Datum publikace 10. 2. 2011 [Datum citace 3. 7. 2013]. URL:<http://www.josefnav.cz/Arduino_akcelerometr.html/>

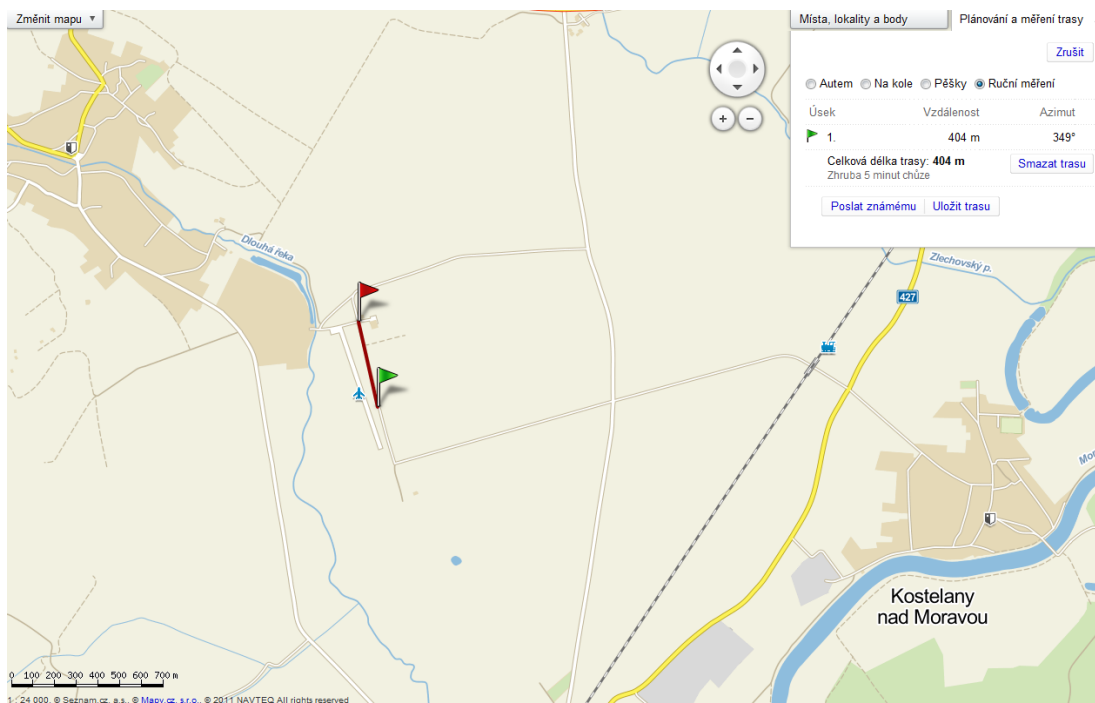
Seznam příloh

Mapy.....	I
Manipulace s daty.....	II
Fotodokumentace.....	III
Fotodokumentace	IV
Fotodokumentace	V
Fotodokumentace	VI
Matlab.....	VII
Matlab	VIII
Příloha na CD.....	XI

Mapy



Mapa s vyznačenou trasou, kde bylo provedeno měření akcelerace. Zdroj: Mapy.cz

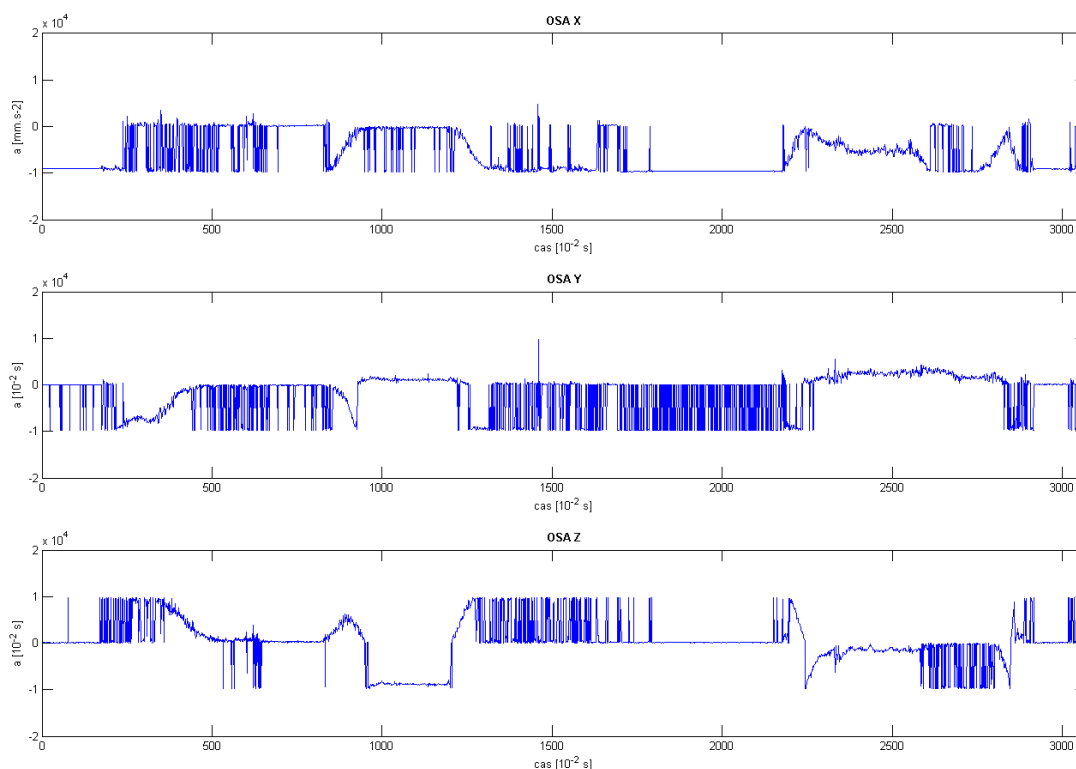


Mapa s vyznačenou trasou se špatným stavem komunikace Zdroj: Mapy.cz

Manipulace s daty

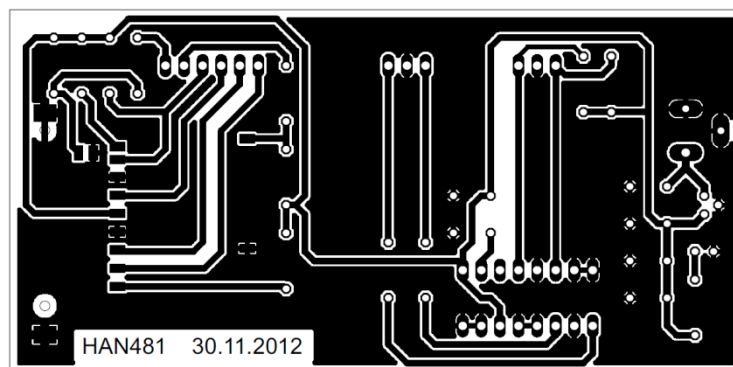
14-bit Data	Range $\pm 2g$ (0.25 mg)	Range $\pm 4g$ (0.5 mg)	Range $\pm 8g$ (1.0 mg)
01 1111 1111 1111	1.99975g	+3.9995g	+7.999g
01 1111 1111 1110	1.99950g	+3.9990g	+7.998g
...
00 0000 0000 0001	0.00025g	+0.0005g	+0.001g
00 0000 0000 0000	0.00000g	0.00000g	0.000g
11 1111 1111 1111	-0.00025g	-0.0005g	-0.001g
...
10 0000 0000 0001	-1.99975g	-3.9995g	-7.999g
10 0000 0000 0000	-2.00000g	-4.0000g	-8.000g
8-bit Data	Range $\pm 2g$ (15.6 mg)	Range $\pm 4g$ (31.25 mg)	Range $\pm 8g$ (62.5 mg)
0111 1111	1.9844g	+3.9688g	+7.9375g
0111 1110	1.9688g	+3.9375g	+7.8750g
...
0000 0001	+0.0156g	+0.0313g	+0.0625g
0000 0000	0.000g	0.0000g	0.0000g
1111 1111	-0.0156g	-0.0313g	-0.0625g
...
1000 0001	-1.9844g	-3.9688g	-7.9375g
1000 0000	-2.0000g	-4.0000g	-8.0000g

Tabulka příkladu výstupních bitových hodnot akcelerometru [10]

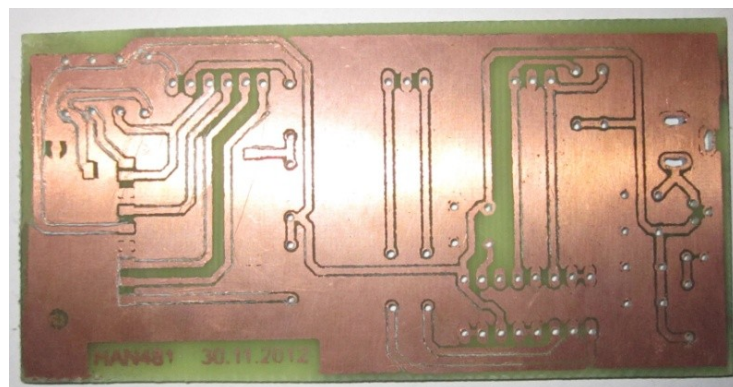


Graf nesprávné manipulace s daty z akcelerometru

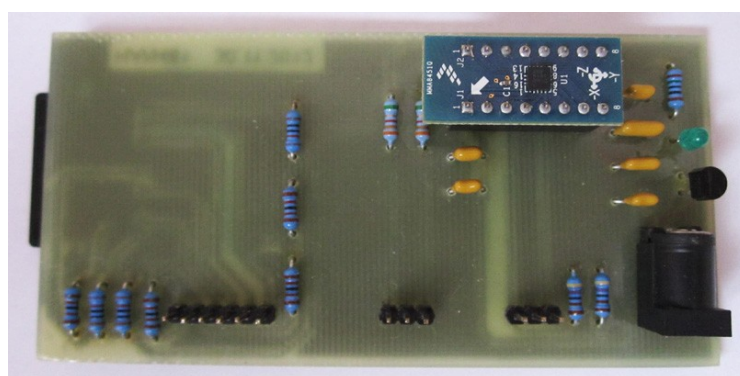
Fotodokumentace



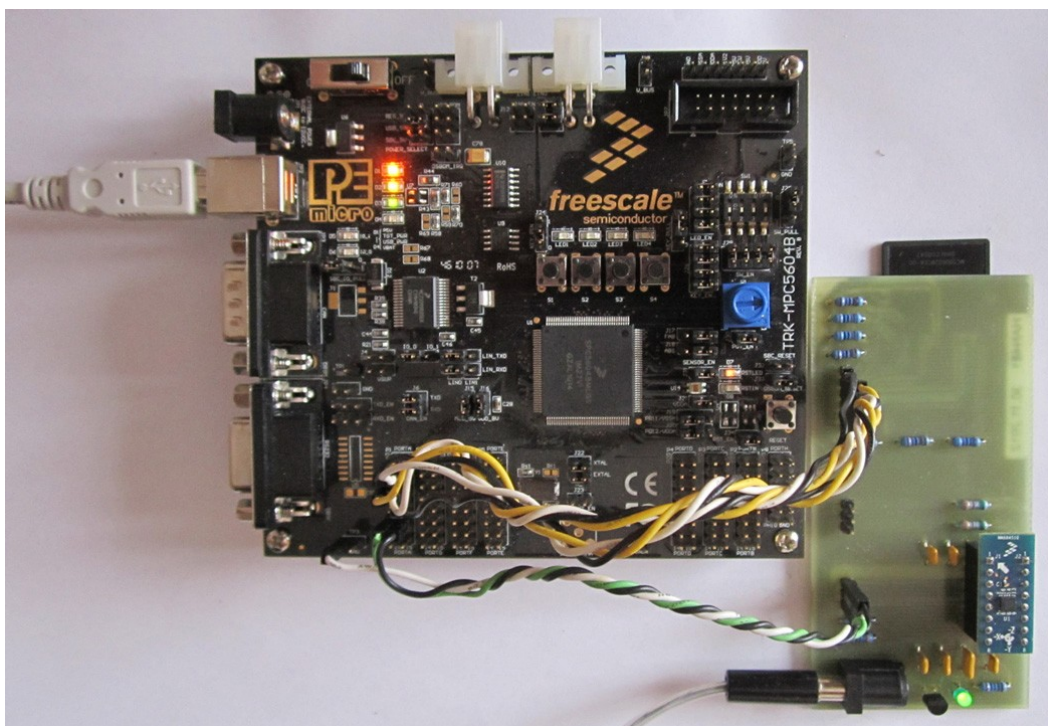
Předloha desky plošného spoje



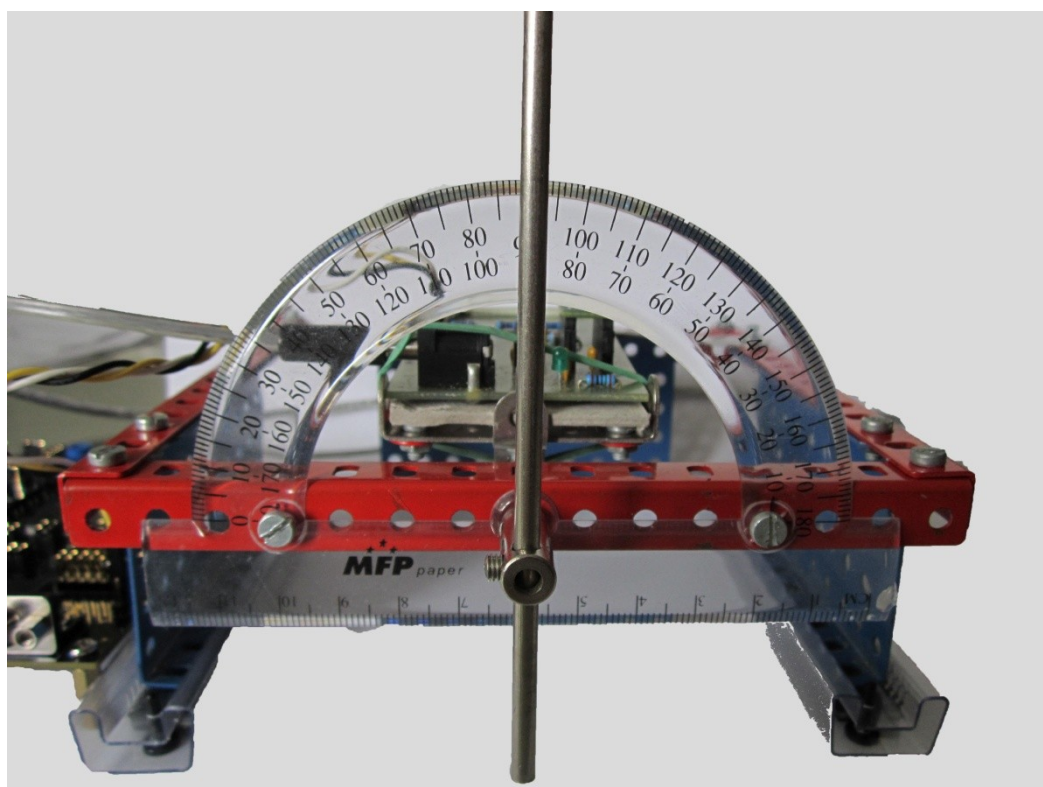
Vyrobená deska plošného spoje



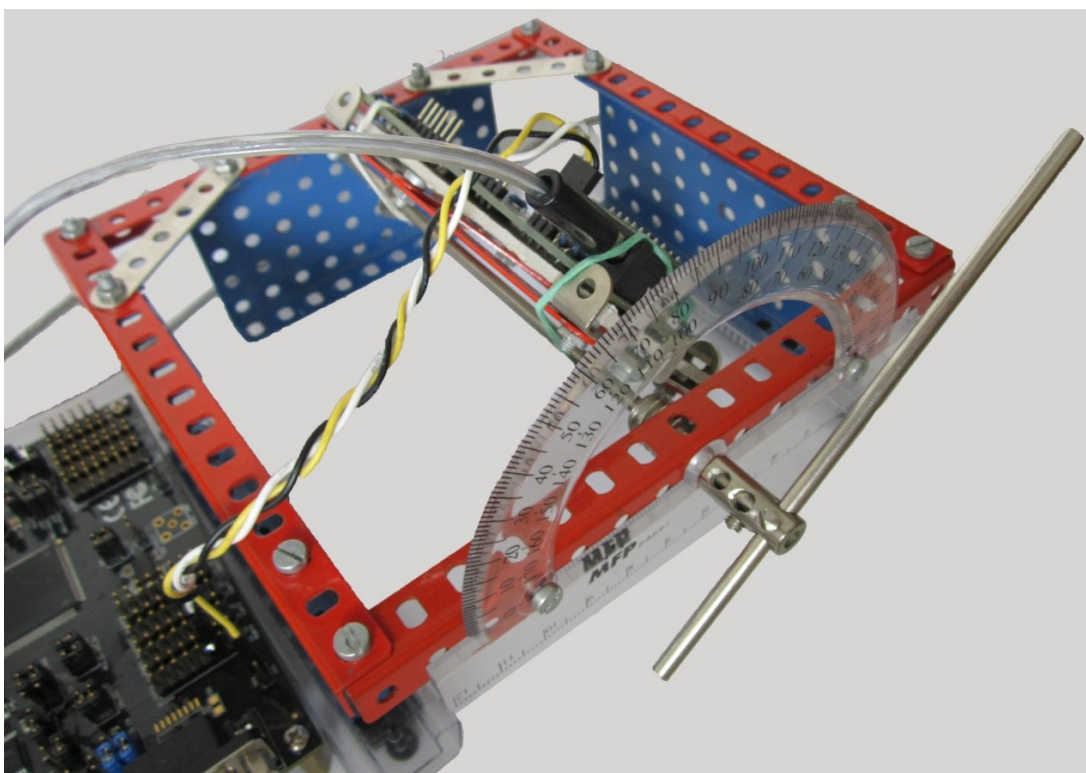
Osazená deska součástkami a akcelerometrem



Ukázka vývojového kitu propojeného s přípravkem s akcelerometrem



Ukázka přípravku pro měření náklonu



Ukázka přípravku měření úhlu náklonu



Ukázka použitého automobilu pro měření s akcelerometrem



Pohled z automobilu na testovacím úseku vozovky



Pohled na měřicí řetězec na palubní desce a pohled na špatnou komunikaci

Matlab

```
clc;
clear all;
close all;

fid = fopen('C:\Dropbox\Diplomka\DP_data\spatna_data.bin','r');

[dataall, readcnt] = fread(fid, 'int16','ieee-be');

%Cyklus pro nacteni dat ze souboru do od X,Y a Z
cnt = 1;
cntaux = 1;
while(1)
    X(cntaux) = dataall(cnt);
    Y(cntaux) = dataall(cnt + 1);
    Z(cntaux) = dataall(cnt + 2);
    cntaux = cntaux + 1;
    cnt = cnt + 3;
    if(cnt >= readcnt)
        break;
    end
end

fclose(fid);
%nastaveni rozliseni dat 2g/4g/8g
mod = 8;

% VALUE / const = X mm/s^2
% 16380/9806.65 = const
%2g mod konstanta
if(mod == 2)
    const = 16380/9806.65;
end
%4g mod konstanta
if(mod == 4)
    const = 8188/9806.65;
end
%8g mod konstanta
if(mod == 8)
    const = 4095/9806.65;
end

%prepocet na skutecnou velikost g
index=1;
while(1)
    Xg(index) = ((X(index))/const);
    Yg(index) = ((Y(index))/const);
    Zg(index) = ((Z(index))/const);
    index = index + 1;
    if (index > length(X))
        break;
    end
end
```

```

%Hodnoty maxim a minim os
Xmax = max(Xg);
Xmin = min(Xg);
Ymax = max(Yg);
Ymin = min(Yg);
Zmax = max(Zg);
Zmin = min(Zg);

%Hodnoty výsledného vektoru
index = 1;
while(1)
    G(index) = sqrt((Xg(index))^2+(Yg(index))^2+(Zg(index))^2);
    index = index + 1;
    if (index > length(Xg))
        break;
    end
end

%Všechny osy v jednom grafu v a = m.s-2
figure(4)
plot(Xg/1000,'blue');
hold on
plot(Yg/1000,'green');
hold on
plot(Zg/1000,'black');
xlabel('cas [10^-^2 s]');
ylabel('a [m.s-2]');
title('3 osy','FontWeight','b');
legend('Osa X','Osa Y','Osa Z');

%Graf v a = m.s-2
figure(10)
plot(Yg/1000);
xlabel('cas [10^-^2 s]');
ylabel('a [m.s-2]');
title('OSA Y','FontWeight','b');

```

Další zdrojové kódy z Matlabu i pro mikrokontrolér jsou přiloženy v příloze na CD.

Příloha na CD

- Diplomová práce
- Dokumentace MMA845xQ
- Dokumentace MPC5604B
- Fotodokumentace
- Naměřená data
- Schéma přípravku
- Video
- Zdrojový kód C
- Zdrojový kód Matlab